

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

**SYSTÉM PRO POČÍTAČOVÉ MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK
TRANZISTORŮ**

SYSTEM FOR COMPUTER MEASUREMENT OF TRANSISTOR CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Krásl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Krásl

ID: 203266

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Systém pro počítačové měření charakteristik tranzistorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami měření charakteristik tranzistorů. Navrhněte koncepci a realizujte přípravek pro počítačové měření charakteristik bipolárních i unipolárních tranzistorů v jejich třech základních zapojeních. Proveďte ověřovací měření vybraných parametrů a výsledky srovnajte se simulacemi v programu PSpice.

Seznamte se s funkcemi pro řízení měřicího procesu a snímání naměřených dat v programu Matlab. Vytvořte ovládací program pro počítačové měření charakteristik základních tranzistorových stupňů, finalizujte měřicí přípravek a ověřte jeho funkci. Připravte podklady pro demonstrační laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LÁNÍČEK, R. Elektronika – obvody, součástky, děje. Praha: BEN – technická literatura, 1998.

[2] KAINKA, B. Měření, řízení a regulace pomocí PC – Vývoj hardwaru a softwaru pro praxi. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá metodami měření charakteristik tranzistorů ve třech základních zapojeních. U každého ze zapojení je uveden příklad charakteristiky získané ze simulátoru. Z výsledných charakteristik jsou odečteny diferenční parametry, které popisují lineari-zované náhradní schéma tranzistoru. Pro automatizaci procesu získávání charakteristik je dalším krokem této práce návrh a stavba analyzátoru. V jednotlivých kapitolách je podrobně popsána funkce jednotlivých částí hardwaru. Pro ovládání analyzátoru byla vytvořena aplikace pro počítač, která tak plní funkci uživatelského rozhraní. Závěrem práce je návod pro demonstrační laboratorní úlohu.

KLÍČOVÁ SLOVA

bipolární tranzistor, charakteristiky, analýza, měřicí zdroj, diferenční parametry

ABSTRACT

This thesis is focused on methods of measuring the characteristics of transistors in three basic connections. There is an example of the characteristic obtained from the simulator for each of the connections. Differential parameters are obtained from the resulting characteristics. These parameters describe a linearized equivalent circuit diagram of the transistor. To automate the process of obtaining characteristics, the next step of this work is the design and construction of the analyzer. The function of individual parts of the hardware is described in detail in the individual chapters. A computer application was created to control the analyzer. This application serves as the user interface. The conclusion of this thesis is a guide for a demonstration laboratory task.

KEYWORDS

bipolar transistor, characteristics, analysis, measuring supply, differential parameters

KRÁSL, Martin. *Systém pro počítačové měření charakteristik tranzistorů*. Brno, 2019, 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Systém pro počítačové měření charakteristik tranzistorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Tranzistory	12
1.1 Bipolární tranzistory	12
1.1.1 Metoda měření h-parametrů	13
1.1.2 Zapojení se společným emitorem	14
1.1.3 Zapojení se společnou bází	16
1.1.4 Zapojení se společným kolektorem	18
1.2 Unipolární tranzistory	20
1.2.1 Náhradní model	21
2 Hardwarové řešení analyzátoru	22
2.1 Měřicí zdroje	23
2.1.1 Vstupní část	24
2.1.2 Výstupní část	25
2.1.3 Snímání proudu	26
2.1.4 Snímání napětí	27
2.1.5 Napěťové děliče pro mikrokontrolér	28
2.1.6 Digitální část	29
2.1.7 Souhrn režimů měření	30
2.2 Návrh plošného spoje	32
2.3 Způsob práce s analyzátozem	33
2.4 Napájení analyzátoru	33
2.4.1 Návrh spínané části	34
2.4.2 Návrh lineární části	37
2.4.3 Konstrukce	38
2.4.4 Uvedení do provozu	38
3 Softwarové vybavení	39
3.1 Firmware mikrokontroléru	39
3.1.1 Komunikační protokol	40
3.2 Ovládací aplikace pro PC	40
3.2.1 Grafické uživatelské prostředí	41
3.2.2 Způsob provedení kalibrace analyzátoru	42
4 Demonstrační úloha	43
4.1 Cíle úlohy	43
4.2 Teoretický úvod	43

4.3	Zadání	45
4.3.1	Měření charakteristik pomocí simulátoru	45
4.3.2	Automatizované měření pomocí analyzátoru	46
4.3.3	Výpočet parametrů zesilovače	47
4.4	Řešení laboratorní úlohy	48
4.4.1	Měření pomocí simulátoru P-Spice	48
4.4.2	Automatizované měření pomocí analyzátoru	49
4.5	Výpočet parametrů zesilovače	50
Závěr		51
Literatura		53
Seznam symbolů, veličin a zkratk		54
A Schéma napájecího zdroje		55
B Analyzátor - schéma měřicího zdroje č.1		56
C Analyzátor - schéma měřicího zdroje č.2		57
D Analyzátor - řídicí část		58
E Analyzátor - napájecí část		59
F Analyzátor		60
G Napájecí zdroj		64
H Demostrační úloha - Charakteristiky z programu P-Spice		67
H.0.1	Převodní charakteristika	67
H.0.2	Výstupní charakteristika	68
H.0.3	Vstupní charakteristika	69
H.0.4	Zpětná charakteristika	70

Seznam obrázků

1.1	Struktura NPN a PNP tranzistoru [3]	13
1.2	Čtyřsvorkový lineární systém reprezentující tranzistor [2]	13
1.3	Náhradní schéma tranzistoru se společným emitorem [2]	14
1.4	Schéma zapojení měřicího pracoviště	15
1.5	Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. emitorem (simulace PSpice)	16
1.6	Náhradní schéma tranzistoru se společnou bází [2]	17
1.7	Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. bází (simulace PSpice) . .	18
1.8	Náhradní schéma tranzistoru se společným kolektorem [2]	19
1.9	Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. kolektorem (simulace PSpice)	20
1.10	Náhradní model při zapojení se společným sourcem	21
1.11	Charakteristiky přechodového FET tranzistoru [1]	21
2.1	Blokové schéma analyzátoru	22
2.2	Blokové schéma měřicího zdroje	23
2.3	Vstupní část měřicího zdroje	25
2.4	Výstupní část měřicího zdroje	25
2.5	Maximální ztrátový výkon vs tepelný odpor chladiče [6]	26
2.6	Schéma části obvodu zajišťujícího měření výstupního proudu	27
2.7	Schéma části obvodu zajišťujícího měření výstupního napětí	28
2.8	Schéma napěťových děličů	28
2.9	Mezní kmitočty děličů	29
2.10	Vymezení částí plošného spoje	32
2.11	Útlum LC filtru	37
3.1	Ovládací aplikace	41
4.1	Náhradní schéma tranzistoru se společným emitorem [2]	43
4.2	Proložení charakteristik tranzistoru přímkou v pracovním bodě	44
4.3	Schéma tranzistorového zesilovače	45
4.4	Zapojení v programu P-Spice	46
4.5	Nastavení rozmítání analyzátoru	47
4.6	Náhradní schéma obvodu	47
4.7	Získané charakteristiky pomocí počítačem řízeného analyzátoru . . .	49
F.1	Fotografie - Pohled z vrchní strany součástek	60
F.2	Fotografie - Pohled ze spodní strany spojů	61
F.3	Osazovací plán analyzátoru - vrchní strana	62
F.4	Osazovací plán analyzátoru - spodní strana	62
F.5	Strana spojů analyzátoru - vrchní strana	63
F.6	Strana spojů analyzátoru - spodní strana	63
G.1	Fotografie - Pohled z vrchní strany součástek	64

G.2	Fotografie - Pohled ze spodní strany spojů	65
G.3	Osazovací plán napájecího zdroje - pouze vrchní strana	65
G.4	Strana spojů napájecího zdroje - pouze spodní strana	66
H.1	Převodní charakteristika	67
H.2	Výstupní charakteristika	68
H.3	Vstupní charakteristika	69
H.4	Zpětná charakteristika	70

Seznam tabulek

2.1	Přehled možných výstupních rozsahů napěťového převodníku	24
2.2	Přehled rozsahů měřených proudů	26
2.3	Přehled režimů zdroje napětí	31
2.4	Přehled režimů zdroje proudu	31
3.1	Souhrnná tabulka možných pokynů	40
4.1	Srovnání H-parametrů ze simulace a reálného měření	52

Úvod

Pro návrh elektronických zapojení využívajících tranzistory, ať už se jedná například o zesilovače nebo napěťové stabilizátory, je důležité znát jejich parametry. Tranzistor je třívývodová součástka a je možné ji tak zapojit ve vícero konfiguracích. To obnáší velké množství charakteristik, které jsou často neúplné nebo zcela chybí v dokumentaci od výrobce. Jedna z možností, jak problém vyřešit, je každou charakteristiku ručně odměřit. Manuální měření je však velmi zdlouhavé a může se ve výsledku prodražit.

Na trhu tak lze nalézt přímo laboratorní přístroje, které umí tento proces automatizovat. Nevýhodou často bývá vysoká cena, která pro většinu domácích kutilů, případně začínajících firem, bývá nepřijatelná. Z tohoto důvodu se tato práce zabývá návrhem a stavbou cenově dostupného analyzátoru vhodného jak pro domácí užití, tak i jako školní pomůcka v laboratorních cvičeních.

Jako jedna z možných laboratorních úloh se jeví provedení simulací v některém ze simulátorů elektronických obvodů a poté během krátké chvíle výsledky srovnat s naměřenými charakteristikami získanými pomocí analyzátoru.

Během návrhu je však možné narazit na řadu obtíží, zejména v nedostatečné přesnosti měření způsobené rušivými napětími. Návrh výsledného plošného spoje musí tedy splnit určité zásady.

1 Tranzistory

Na začátku 20. století jako zesilovací prvek dominovaly elektronky. Jejich princip byl založen na tepelné emisi, jejíž objev je přisuzován T. A. Edisonovi [1].

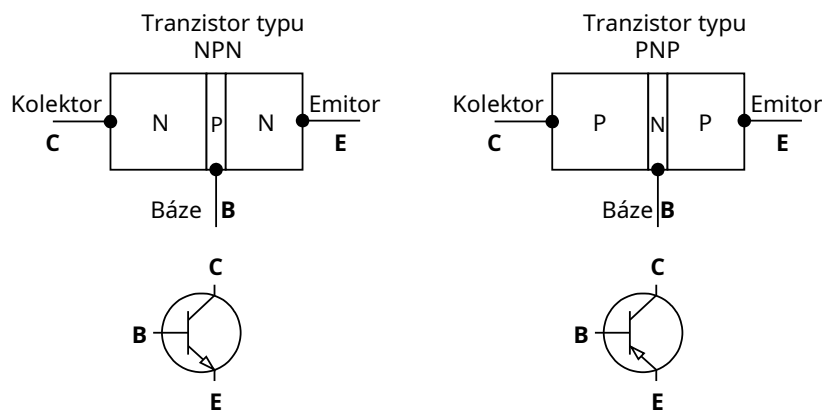
Nevýhodou takových součástek byla nejen velikost, ale zpočátku také častá poruchovost.

Později v roce 1947 tým vědců (William Shockley, John Bardeen a Walter Brattain) v Bellových laboratořích objevili tranzistorový jev, vznikla tak nová součástka - tranzistor, ta umožnila vznik zcela nových technologií. Velkou výhodou oproti vákuovým prvkům je především dlouhá životnost a velmi malé rozměry. Díky tomu je možné dlouhodobě provozovat na jednom malém křemíkovém čipu až milióny tranzistorů.

Využití tranzistorů lze shrnout na část analogovou a digitální. V analogové části se tranzistory uplatní například ve zdrojích a zesilovačích. Digitální, kde je tranzistor využit jako elektronický spínač, nejčastěji v numerických systémech (počítačích). Ke správnému návrhu takového zařízení je však zapotřebí znát důležité parametry, které bývají v dokumentacích jen velmi málo popsány, často chybí úplně. Zbývá tedy si tyto parametry (charakteristiky) odměřit.

1.1 Bipolární tranzistory

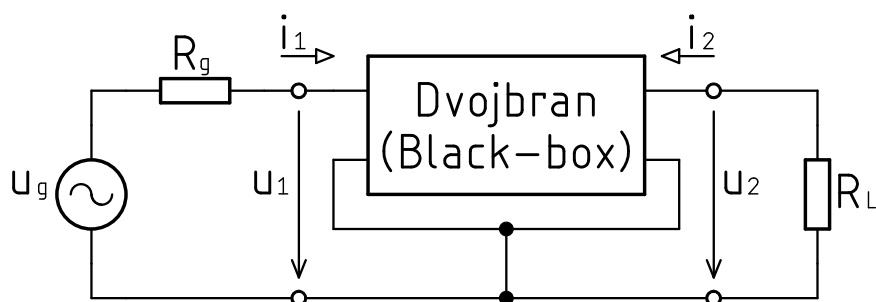
Bipolární tranzistor se skládá ze tří polovodičových vrstev typu P nebo N, může tak být typu NPN nebo PNP viz obr.1.1. Pouhým přiložením těchto vrstev však není možné vytvořit tranzistor. Jedna z možností je dotovat přídavnými prvky jediný monokrystal křemíku, a vytvořit tak oblasti typu N nebo P. Nutnou podmínkou správné funkce u obou typů je úzká vnitřní vrstva. Elektrody jsou poté vytvořeny tak, že se připojí k těmto různým oblastem. V praxi většina tranzistorů bývá vytvořena asymetricky, kde kolektor bývá větší než emitor [3].



Obr. 1.1: Struktura NPN a PNP tranzistoru [3]

1.1.1 Metoda měření h-parametrů

Chování tranzistoru lze popsat pomocí dvojbranu (Black-box) na obr. 1.2. Tento koncept analýzy zařízení (jedné části nebo celého systému) využívá soustavy lineárních rovnic popisujících chování výstupního napětí / proudu na základě vstupního napětí / proudu. Tranzistor je třívývodová součástka, tím tedy jeden z vývodů musí být uveden jako společný, zbývající dva poslouží jako vstupní a výstupní. Dělíme je tak na zapojení se společným emitorem, bází a kolektorem [2].



Obr. 1.2: Čtyřsvorkový lineární systém reprezentující tranzistor [2]

Počítačové modely většinou používají admitanční matice, ale pro orientační měření je užitečnější použít hybridní linearizovaný model. Na vstupu se tranzistor chová jako reálný zdroj napětí se zpětným přenosem h_{12} a vstupním odporem h_{11} . Ekvi- valentem může být zapojení popsané na základě h parametrů, které dodá fyzický náhled vnitřku dvojbranu [1].

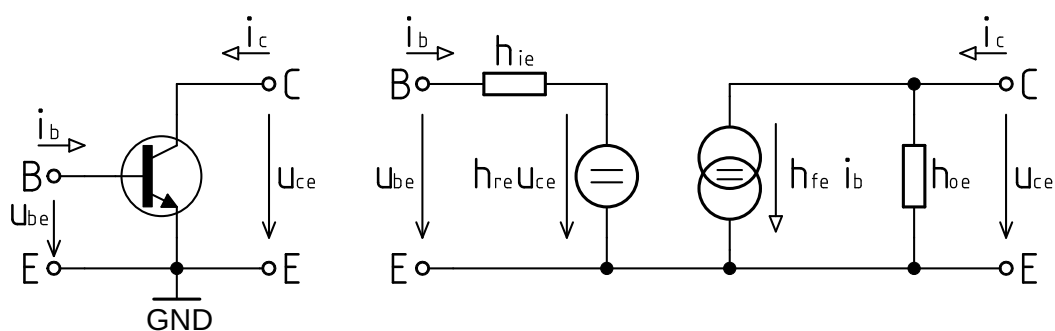
Jelikož h-parametry závisí na způsobu zapojení, jsou v následujících náhradních schématech uvedeny h-parametry s indexy konkrétní aplikace. Zde první znak spodního indexu reprezentuje druh parametru a druhý znak indexu použitou společnou elektrodu. Pro názorný příklad byly vygenerovány průběhy v simulačním prostředí PSpice, předmětem zkoumání byl tranzistor BC337, jehož nejčastější uplatnění spočívá ve spínání různých zátěží (relé apod.), především díky poměrně velkému kolektorovému proudu $I_{Cmax} = 500 \text{ mAdc}$ [8].

1.1.2 Zapojení se společným emitorem

Jedná se zřejmě o jedno z nejčastějších zapojení [3], především pro svůj velký vstupní odpor a malý výstupní odpor. Na svém vstupu se chová jako klasická křemíková dioda, kde dochází ke strmému nárůstu proudu přibližně při 0,6V až 0,7V. Náhradní schéma tranzistoru popisuje obr. 1.3

Pomineme-li mezní hodnoty, je převodní charakteristika pro různá napětí U_{CE} téměř lineární, lze tak kolektorový proud pokládat za násobek konstanty h_{fe} a vstupního bázevého proudu. Bipolární tranzistor se tedy chová jako proudový zdroj řízený proudem. Změnu proudu lze převést na napětí pomocí rezistoru, který se připojí mezi kladnou napájecí svorku a kolektor, nevýhodou může být otočení fáze výstupního napětí U_{CE} o 180° .

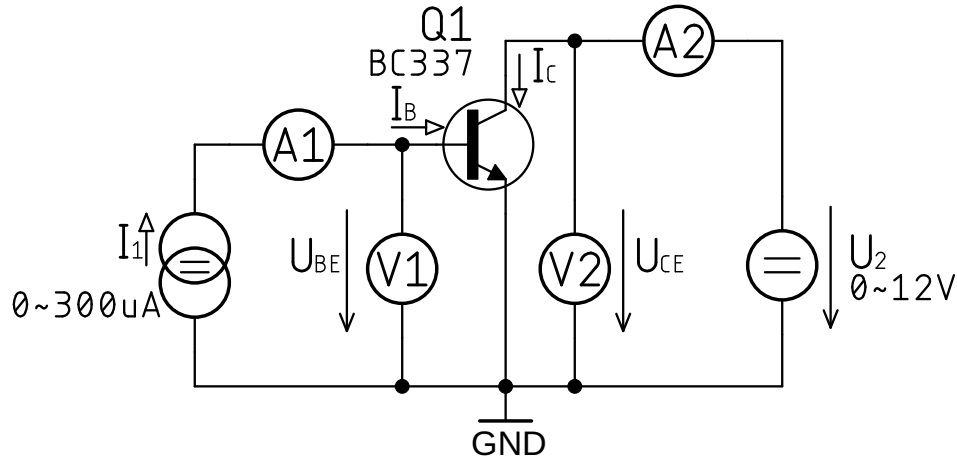
Zpětný přenos bývá zpravidla velmi malý a je zapotřebí ho měřit velmi přesnými přístroji, lze jej tedy v mnoha náhradních schématech často zanedbat, a počítat tak jen se vstupním odporem.



Obr. 1.3: Náhradní schéma tranzistoru se společným emitorem [2]

Samotné měření charakteristik může probíhat za pomoci soustavy proudového a napěťového zdroje. Pro zjištění vstupních a výstupních parametrů slouží připojené voltmetry a ampérmetry. Konkrétní zapojení popisuje obrázek 1.4. Je vhodné, aby

použité zdroje měly možnost nastavení mezních hodnot, tím tak lze zabezpečit ne-zničení tranzistoru během měření. Jednou z možností, jak omezení dosáhnout, je připojení rezistoru ke zdrojům. Nevýhodou je poté potřeba dorovnávat napětí / proud, jelikož by docházelo k úbytkům na rezistorech.



Obr. 1.4: Schéma zapojení měřicího pracoviště

Měření výstupní charakteristiky probíhá tak, že se nastaví bázeový proud, aktuální hodnotu lze odečíst z ampérmetru A1. Jakmile bázeový proud dosáhne požadované hodnoty, po krocích se zvedá napětí U_{CE} indikované voltmetrem V2 na požadovanou mez. Během těchto kroků je zapotřebí odečíst z ampérmetru A2 proud kolektorem I_C . Tento postup je vhodné opakovat i pro jiné bázeové proudy.

Z charakteristiky na obr. 1.11 je poté vhodné zvolit napětí U_{CE} a proud I_B pracovního bodu. Napětí U_{CE} se většinou volí jako poloviční napětí oproti napájecímu napětí ve výsledné aplikaci. Změnou bázeového proudu při zvoleném napětí U_{CE} tak lze získat další závislosti, jako je převodní a vstupní charakteristika. Zpětnou charakteristiku lze získat stejným rozdílem, tentokrát při zvoleném proudu pracovního bodu I_B .

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ie} = h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} [\Omega] \quad | U_{CE} = \text{konst.}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

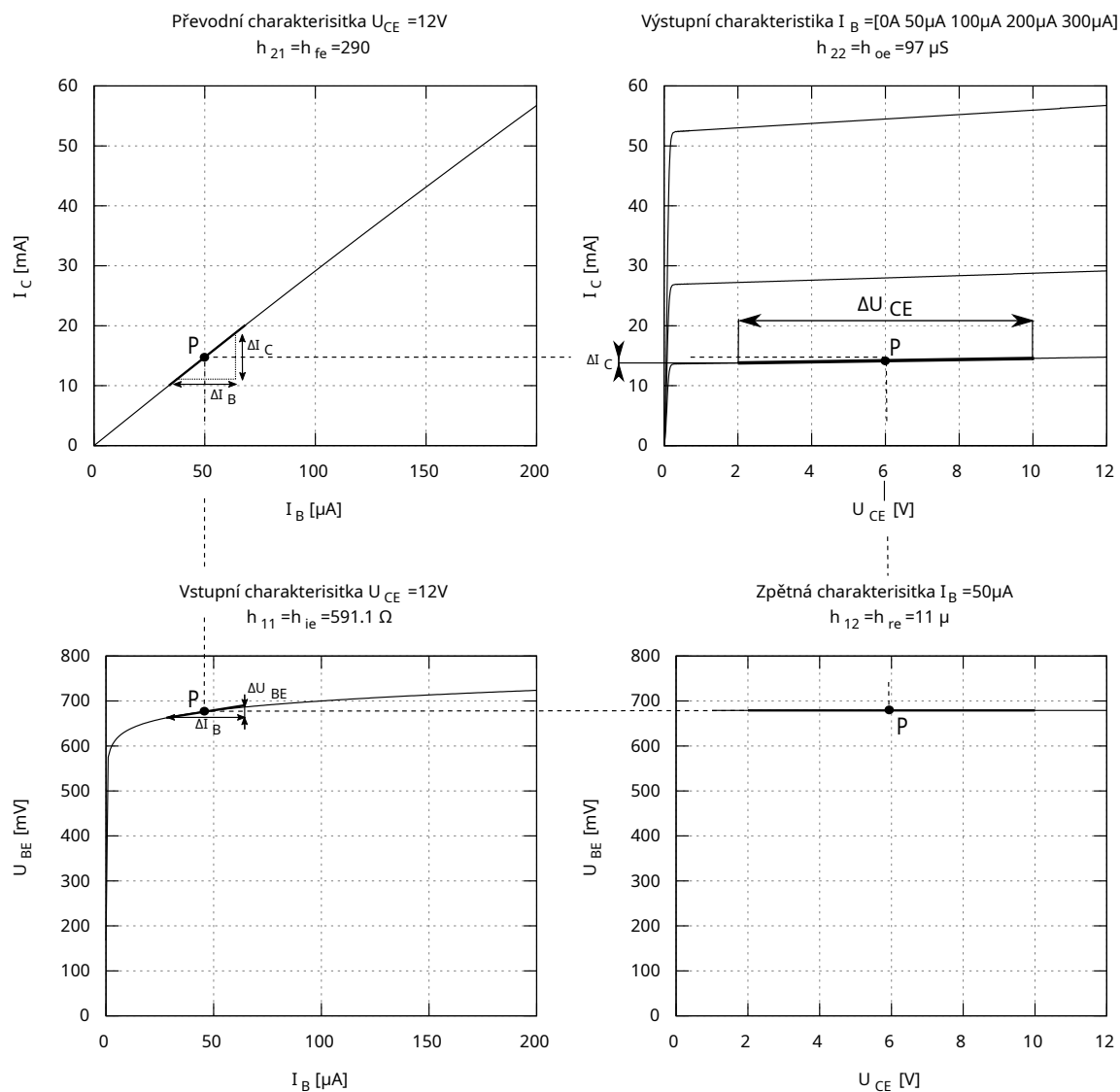
$$h_{re} = h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} [-] \quad | I_B = \text{konst.}$$

Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fe} = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} [-] \quad | U_{CE} = \text{konst.}$$

Výstupní vodivost naprázdno:

$$h_{oe} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} [S] \quad | I_B = \text{konst.}$$

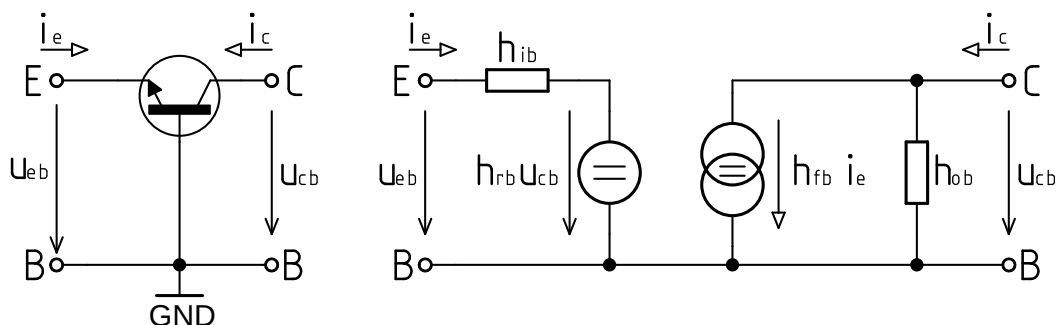


Obr. 1.5: Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. emitorem (simulace PSpice)

1.1.3 Zapojení se společnou bází

Toto zapojení se vyznačuje malým vstupním odporem a velkou výstupní impedancí. Charakteristiky získané ze simulátoru P-SPICE se nacházejí na obr. 1.7. Náhradní schéma tranzistoru popisuje obr. 1.6.

Proudové zesílení bývá zpravidla menší než jedna. Podstatnou část tvoří napěťové zesílení, které závisí na zmíněných odporech a zátěži. Z náhradních rovnic popisujících princip tranzistoru lze usoudit, že při zvýšení napětí U_{BE} dochází ke zvýšení proudu emitoru a snížení vstupního odporu. Tento princip platí i naopak [3]. Díky velké stabilitě bývá často používán v oscilátorech.



Obr. 1.6: Náhradní schéma tranzistoru se společnouází [2]

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ib} = h_{11} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta I_E} [\Omega] \quad |U_{CB} = \text{konst.}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

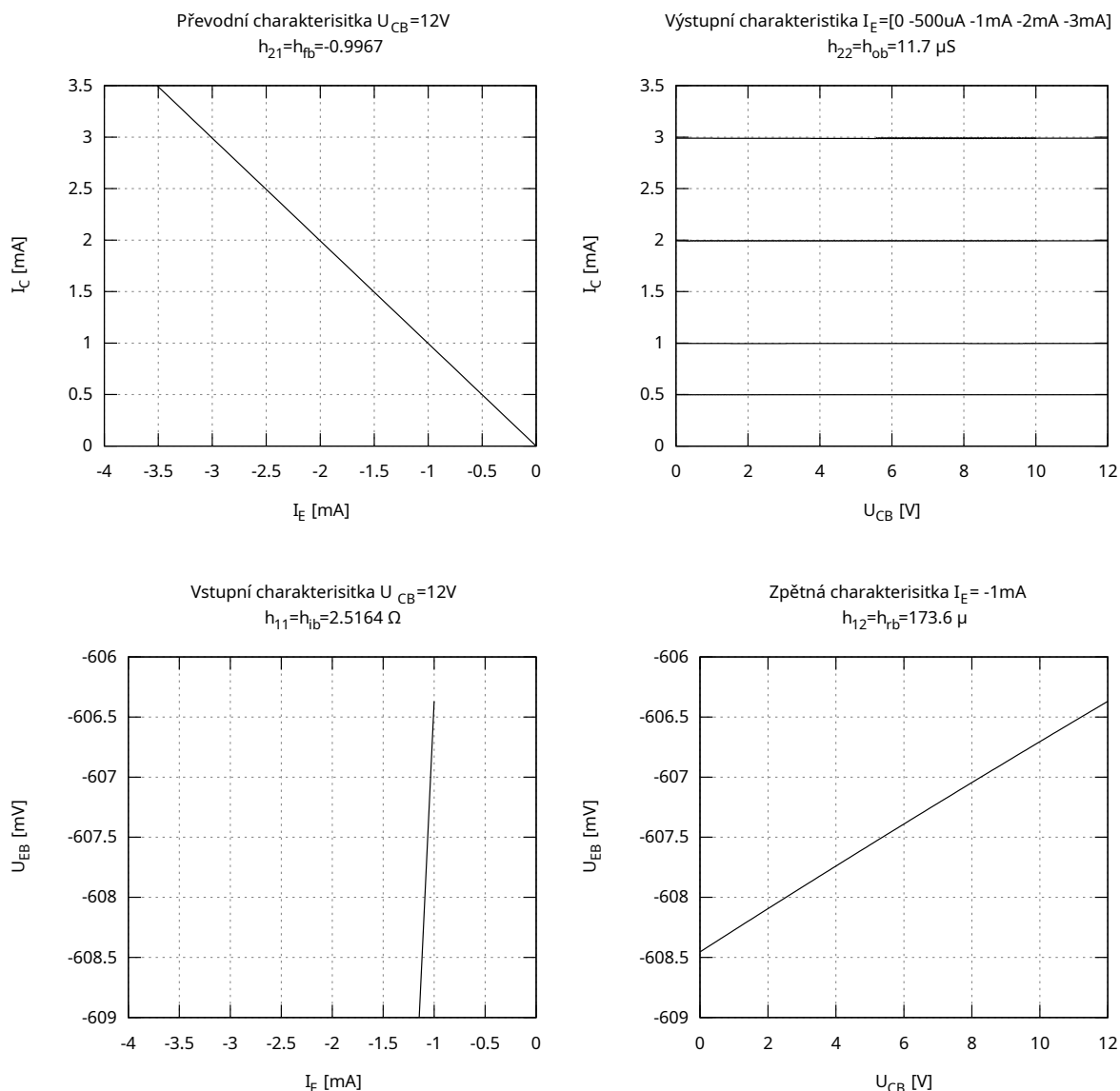
$$h_{rb} = h_{12} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta U_{CB}} [-] \quad |I_E = \text{konst.}$$

Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fb} = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} [-] \quad |U_{CB} = \text{konst.}$$

Výstupní vodivost naprázdno:

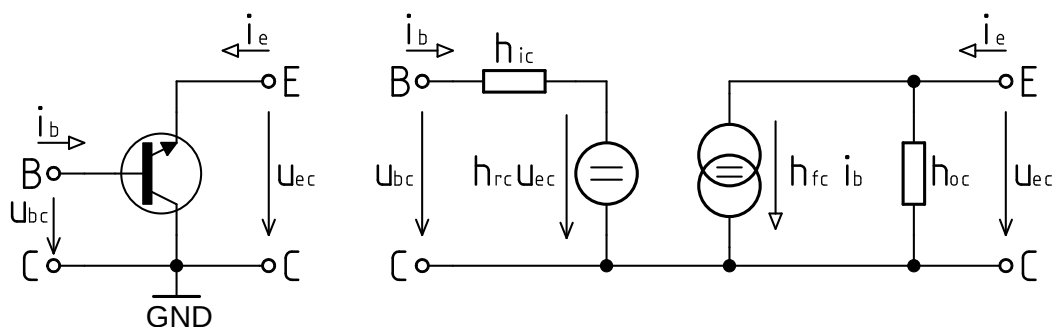
$$h_{ob} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CB}} [S] \quad |I_E = \text{konst.}$$



Obr. 1.7: Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. bází (simulace PSpice)

1.1.4 Zapojení se společným kolektorem

Princip zapojení na obr. 1.8 se podobá zapojení se společným emitorem, jen vstupní odpor bývá obvykle menší, což dokazují níže uvedené charakteristiky získané ze simulátoru na obr. 1.9. Velikost výstupního odporu se naopak snížil. Jelikož zde nedochází ke změně fáze, lze použít tuto konfiguraci známou pod názvem sledovač.



Obr. 1.8: Náhradní schéma tranzistoru se společným kolektorem [2]

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ic} = h_{11} = \frac{\Delta U_{BC}}{\Delta I_B} [\Omega] \quad | U_{EC} = \text{konst.}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

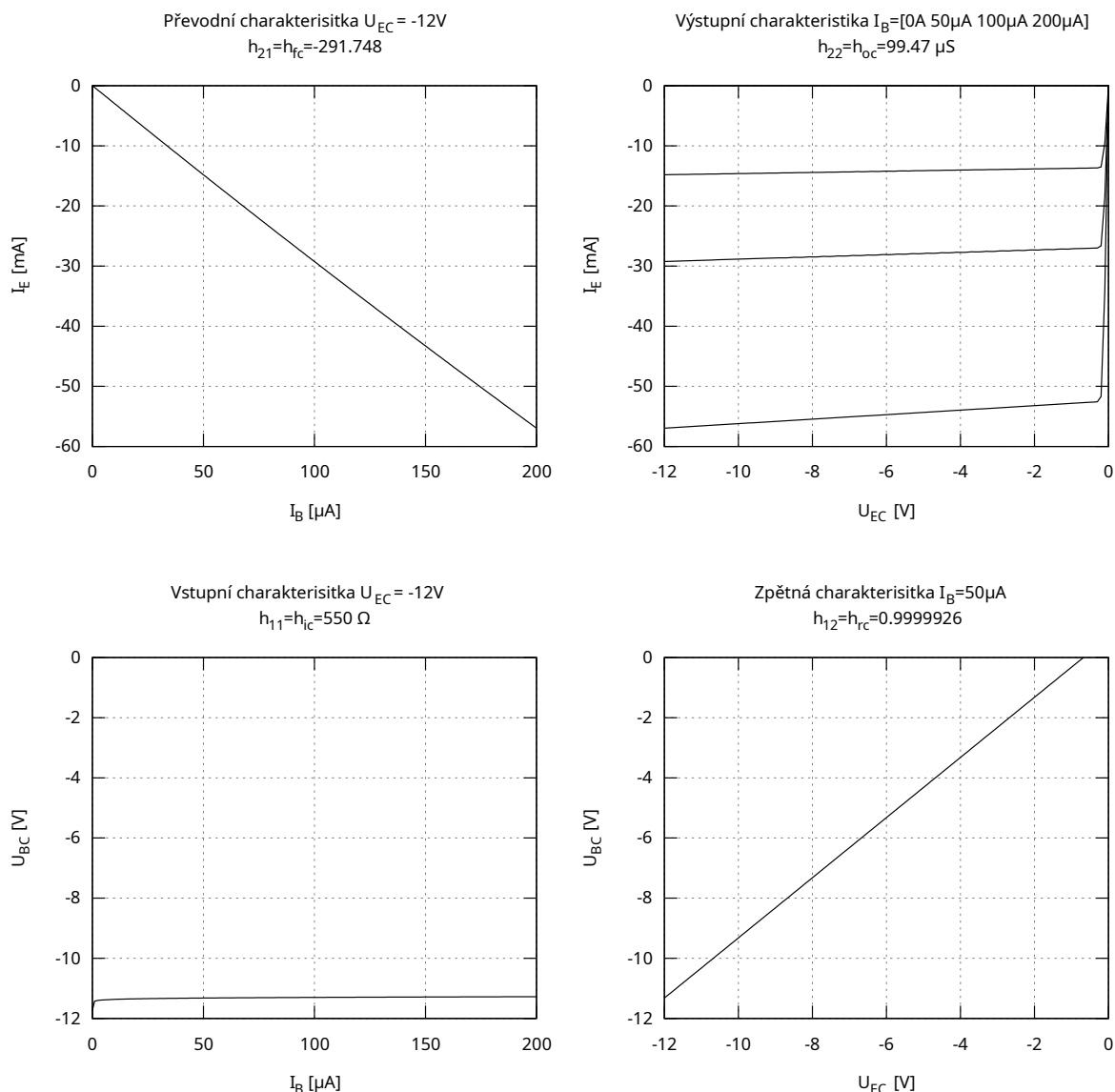
$$h_{rc} = h_{12} = \frac{\Delta U_{BC}}{\Delta U_{EC}} [-] \quad | I_B = \text{konst.}$$

Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fc} = h_{21} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} [-] \quad | U_{EC} = \text{konst.}$$

Výstupní vodivost naprázdno:

$$h_{oc} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{EC}} [S] \quad | I_B = \text{konst.}$$



Obr. 1.9: Charakteristiky tranzistoru BC337 se spol. kolektorem (simulace PSpice)

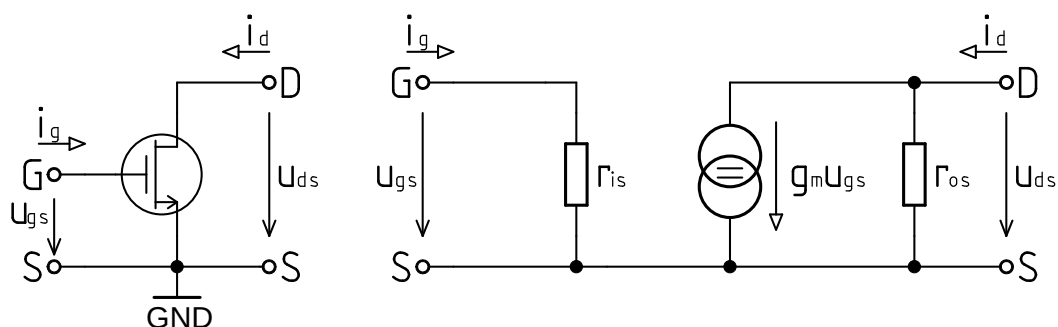
1.2 Unipolární tranzistory

Tato součástka je známá rovněž pod názvem *Field Effect Transistor* (Tranzistor řízený elektrickým polem) (FET). Tyto tranzistory se podle způsobu izolace řídicí elektrody rozdělují do dvou skupin. Pokud je řídicí hradlo izolováno vrstvičkou izolantu, jedná se o tranzistor *Insulated Gate Field Effect Transistor* (IGFET). Nejčastějším izolantem je vrstvička SiO_2 , takže se používá i frekventovanější název *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET). Druhá skupina *Junction*

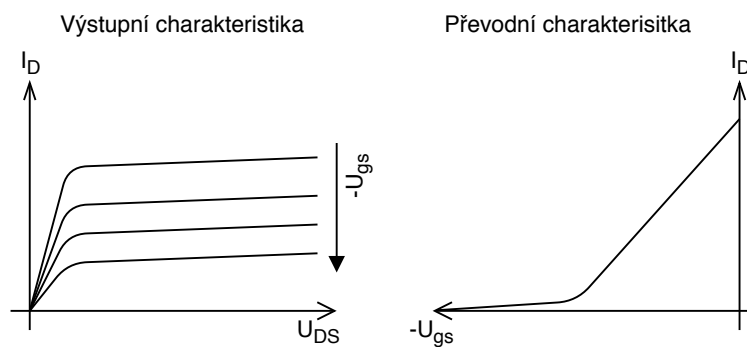
Gate Field Effect Transistor (JFET) má hradlo izolováno závěrně polarizovaným přechodem [1].

1.2.1 Náhradní model

Pro zapojení se společným sourcem viz obr. 1.10 lze tranzistor při výpočtech nahradit proudovým zdrojem řízeným napětím. Vstupní odpor bývá zpravidla značný (řády $10\text{M}\Omega$). Při vyšších kmitočtech se může projevit malá parazitní kapacita mezi gatem a sourcem. Při nízkofrekvenčních aplikacích lze tuto kapacitu zanedbat.



Obr. 1.10: Náhradní model při zapojení se společným sourcem



Obr. 1.11: Charakteristiky přechodového FET tranzistoru [1]

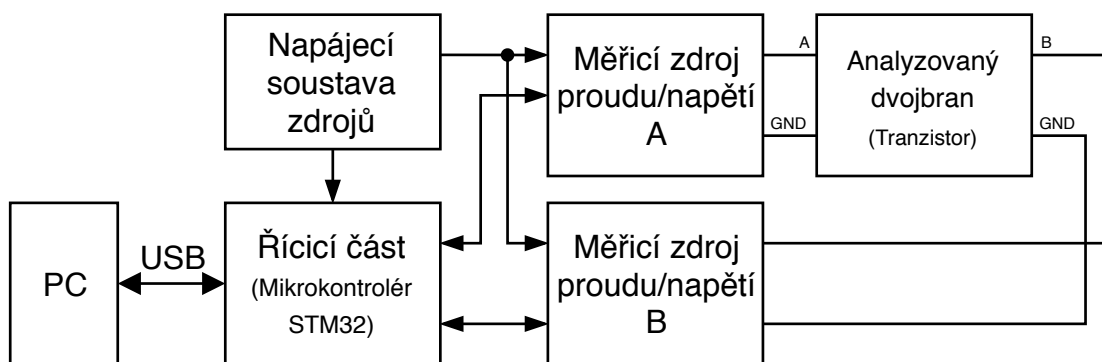
2 Hardwarové řešení analyzátoru

Základem analyzátoru tranzistorů je soustava dvou měřicích zdrojů, které zahrnují měření výstupního proudu a napětí. Mezi další obvody analyzátoru se řadí například obvody zajišťující napájení, řízení, komunikaci. Celkovou představu analyzátoru může nabídnout blokové schéma na obr. 2.1. Při měření bipolárních tranzistorů si lze vystačit jen s jedním proudovým zdrojem a jedním napěťovým zdrojem. Při měření unipolárních tranzistorů stačí pouze napěťové zdroje dva. S takto velkým počtem zdrojů roste nejen složitost zapojení, ale také cena. Z tohoto důvodu je použito zapojení dvou hybridních zdrojů, které dovoluje přepínat mezi režimy proudu nebo napětí.

Přesnost měření se odvíjí od mnoha rušivých vlivů, odchylky odporu rezistorů, parazitní kapacity na plošném spoji, indukčnosti vodičů apod.. Největší podíl na rušení může mít i samotný napájecí zdroj.

Aby se předešlo těmto vlivům, je proto kladen důraz na výběr součástek s co nejlepšími cenově přijatelnými parametry. Vybrané operační zesilovače obsahují možnost připojení externího trimru, jímž lze snížit vstupní napěťovou nesymetrii téměř až k nule. Jednou z dalších možností, jak snížit chyby měření, je dodatečná softwarová kalibrace, která spočívá v úpravě kalibračních křivek, jež za pomoci interpolace přepočítávají data z A/D převodníků na srozumitelnou podobu. Není možné počítat s tím, že lze vše zachránit pouhou softwarovou úpravou. Cílená přesnost není stanovena, avšak jako dostačující se jeví do 5%.

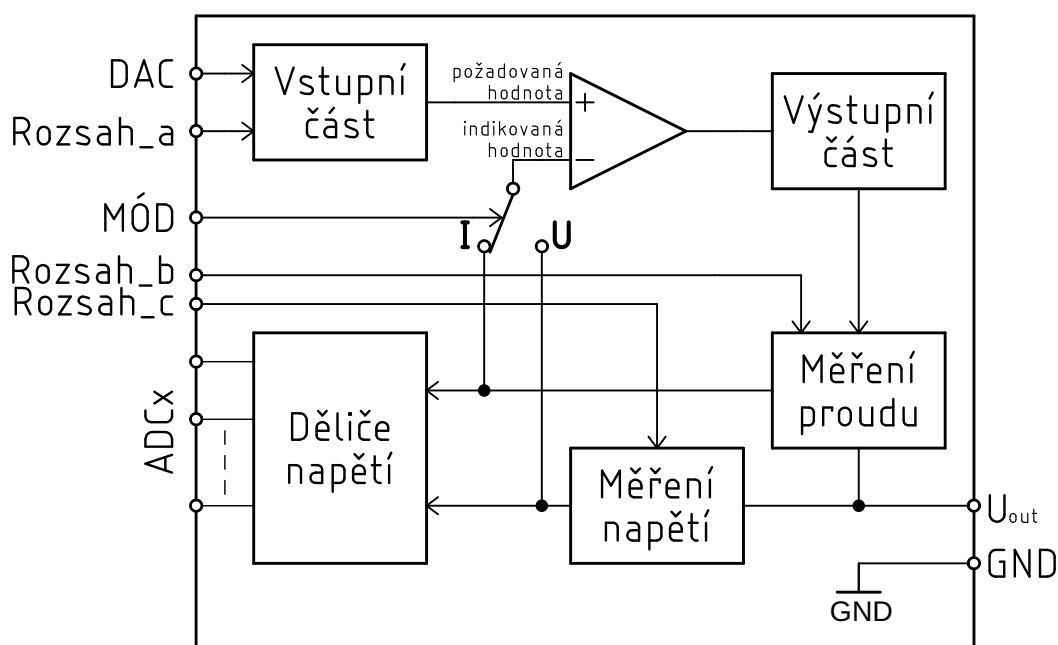
Pro snadné používání analyzátoru, například během přednášek, je zapotřebí malých rozměrů a jednoduchého napájení přípravku, proto se veškeré části musejí vměstnat pokud možno na jediný plošný spoj.



Obr. 2.1: Blokové schéma analyzátoru

2.1 Měřicí zdroje

Měřicí zdroje se skládají ze systému operačních zesilovačů, viz blokové schéma na obr. 2.2, které regulují výstupní požadovanou veličinu. Mikrokontrolér pracuje v jiných napěťových úrovních než většina analogové části analyzátoru, operační zesilovače zde tedy sehrávají roli napěťových zesilovačů, případně děličů, které zajistí, aby měřená výstupní hodnota byla vždy v měřitelném rozsahu. Jelikož během měření je zapotřebí měnit topologii zapojení samotného analyzátoru, jsou pro snazší ovládání užity nízkoproudové digitálně řízené analogové spínače a přepínače. V místech, kde mohou téct velké proudy (např. zátěží), jsou užita relé, tvoří tak jedinou mechanickou část analyzátoru. Výjimkou je relé ve zpětné proudové vazbě, které má mnohem menší přechodový odpor než spínače polovodičová, měření je tak zatíženo menší chybou. Výsledné celkové schéma měřicího analyzátoru lze nalézt v příloze A.



Obr. 2.2: Blokové schéma měřicího zdroje

2.1.1 Vstupní část

Tato část analyzátoru obr. 2.3 převádí výstupní napětí z DAC převodníku uvnitř mikrokontroléru z rozsahu $0 \div 3,3\text{V}$ celkem až na 4 možné užitečné rozsahy, které popisuje následující tabulka 2.1. Celý problém je vyřešen soustavou tranzistorů a jednoho operačního zesilovače. Lze tak nakonfigurovat invertující a neinvertující zesilovač nebo napěťový sledovač. Napěťový rozsah poté závisí na dělicím poměru rezistorů ve zpětné vazbě. Analogové spínače zde nejsou zapotřebí, jelikož vstupní napětí je vždy kladné.

Tab. 2.1: Přehled možných výstupních rozsahů napěťového převodníku

A	B	C	Výstupní napěťový rozsah
OFF	OFF	OFF	$0 \div 3,3\text{ V}$
ON	ON	ON	$0 \div -3,3\text{ V}$
OFF	ON	OFF	$0 \div 15\text{ V}$
ON	OFF	OFF	$0 \div -15\text{ V}$

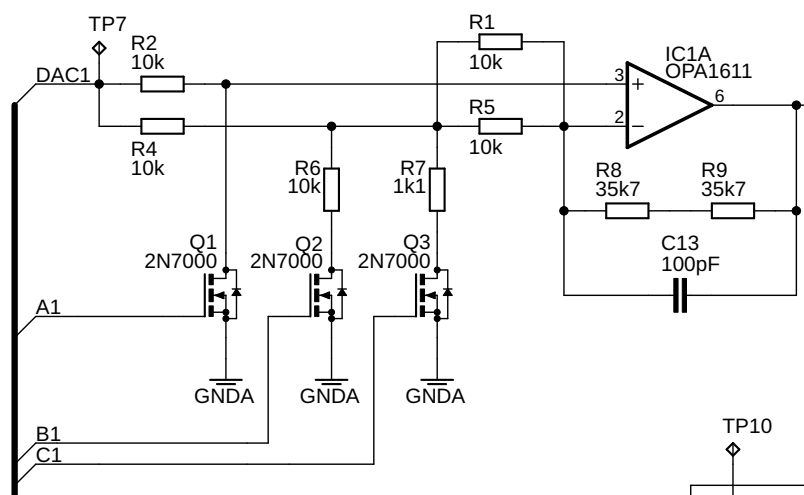
Napěťového rozsahu do $3,3\text{ V}$ je dosaženo principem, že mezi vstupy OZ je nulové napětí. Jelikož vstupní odpor OZ je velmi velký, je napětí z DAC převodníku rovné přímo napětí na obou vstupech OZ. Aby byla podmínka splněna, nesmí procházet žádný proud rezistory a tím tedy je vstupní napětí shodné s výstupním.

Sepnutím všech tranzistorů se OZ přepojí do režimu invertujícího zesilovače. Rezistory R4,R6,R7 zde zajišťují formu děliče napětí tak, aby po zesílení OZ byl zajištěn požadovaný rozsah $-3,3\text{ V}$.

Obdobným způsobem je zajištěn rozsah -15 V , kde se nezapojí přídatný dělič napětí, čímž vlivem vstupních rezistorů R4,R5,R1 a zpětnovazebních rezistorů R8,R9 je zajištěno zesílení na rozsah -15 V .

Rozsah 15 V je zajištěn pouze sepnutím tranzistoru Q2, OZ je tak v režimu kladného zesilovače s předřazeným děličem napětí.

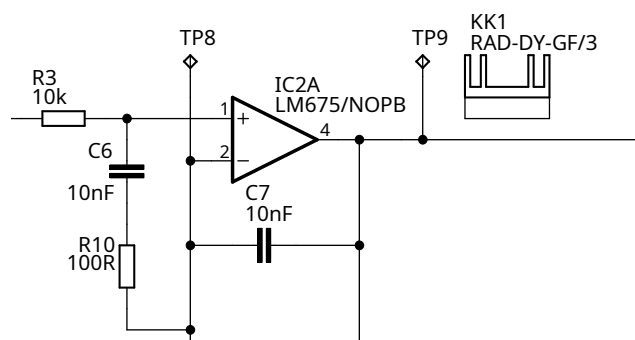
Výpočet a výsledný návrh zapojení byl navržen v simulátoru Falstad metodou odhad-pokus-omyl tak, aby hodnoty odporů rezistorů byly dostupné.



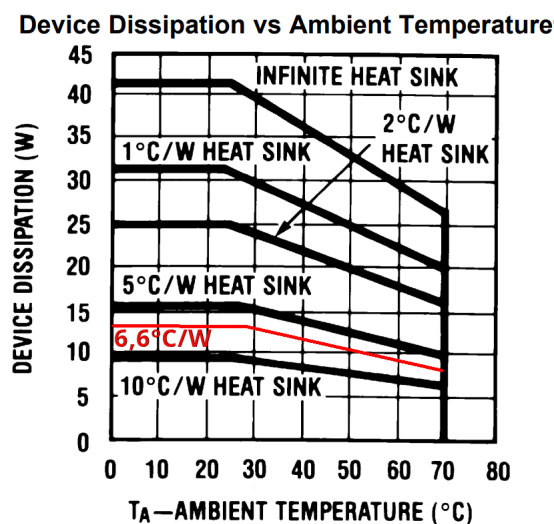
Obr. 2.3: Vstupní část měřicího zdroje

2.1.2 Výstupní část

Výstupní část měřicího zdroje tvoří OZ se zavedenou zpětnou vazbou obr. 2.4, která podává informaci o výstupním napětí nebo proudu. Regulace probíhá tak, že tento OZ udržuje rozdílové napětí mezi svými vstupy na nulové hodnotě. Analyzovaný prvek (tranzistor) tvoří příliš velkou zátěž, a nemůže tak být řízen přímo výstupem běžnými OZ, řešením je výběr výkonového OZ v pouzdře TO220. Při předpokladu, že by výstupní proud OZ činil 0,4 A a úbytek napětí uvnitř OZ by byl roven napájecímu napětí, byl by ztrátový výkon roven 7,2 W. Vybraný chladič RAD-DY-GF/5 má tepelný odpor 6,6 °C/W, zanesením parametrů do grafu obr. 2.5 maximálního ztrátového výkonu lze usoudit, že vybraný chladič je dostačující. Další nedílnou součástí jsou kondenzátory C6,C7, které zajišťují stabilitu OZ tak, že snižují šířku pásma pod mezní šířku pásem obvodů, jež mohou být zařazeny do zpětné vazby.



Obr. 2.4: Výstupní část měřicího zdroje



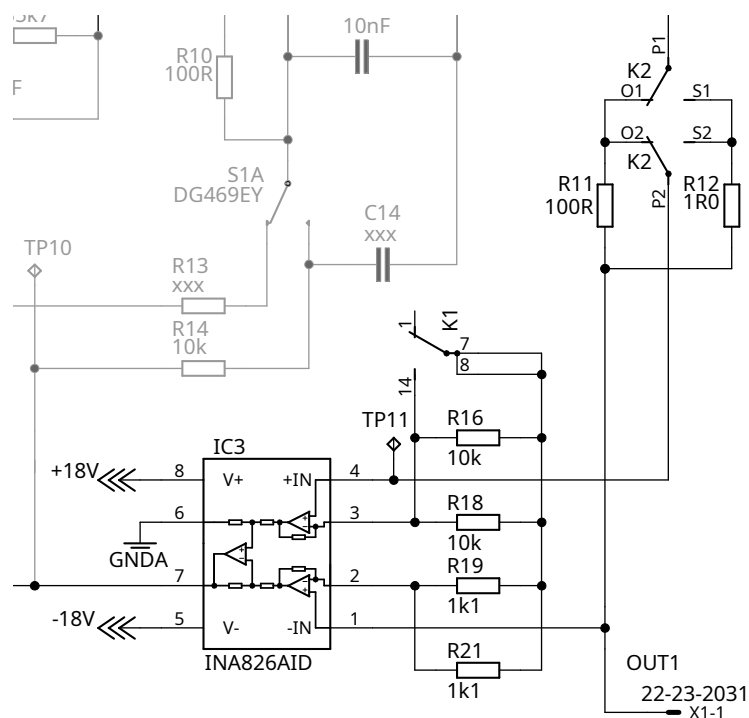
Obr. 2.5: Maximální ztrátový výkon vs tepelný odpor chladiče [6]

2.1.3 Snímání proudu

Výstupní proud prochází rezistorem (bočníkem) obr. 2.6, kde napětí na rezistoru je přímo úměrné výstupnímu proudu. Toto napětí je snímáno a zesíleno instrumentačním zesilovačem IC3, jehož vstupní odpor je dostatečně velký na to, aby neovlivnil měření. Zesílení lze měnit pomocí jazýčkového relé K1, které mění hodnotu odporu ve zpětné vazbě. Původní návrh počítal s použitím analogového spínače, ten by však svým vlivem přechodového odporu zanesl příliš velkou chybu měření. Bočníky lze přepínat pomocí dvoupólového přepínacího relé. Aby se předešlo nežádoucímu vlivu odporu samotných kontaktů uvnitř relé, je použito čtyřsvorkové zapojení. Celkem je tak možné dosáhnout 4 možných rozsahů, které jsou uvedeny v následující tabulce tab. 2.2.

Tab. 2.2: Přehled rozsahů měřených proudů

Jazýčkové relé K1	Relé K2	Proudový rozsah
OFF	ON	-330 mA ÷ 330 mA
ON	ON	-33 mA ÷ 33 mA
OFF	OFF	-3,3 mA ÷ 3,3 mA
ON	OFF	-330 μA ÷ 330 μA

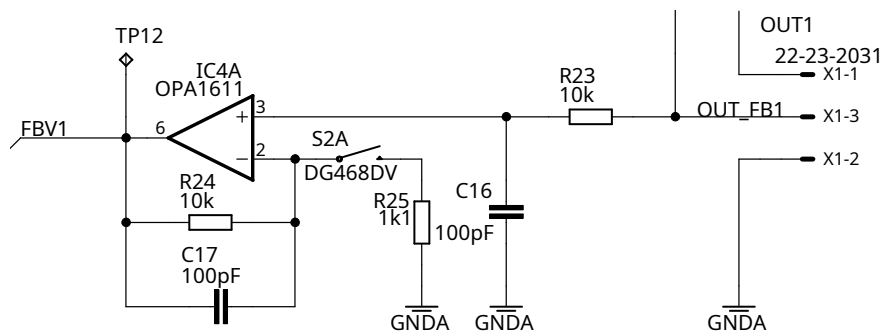


Obr. 2.6: Schéma části obvodu zajišťujícího měření výstupního proudu

2.1.4 Snímání napětí

Výstup nesmí být zatížen žádným odporovým děličem, protože by tak došlo k ovlivnění měření. Výstupní napětí je proto měreno napětovou sondou obr. 2.7, která je realizována samostatným vodičem přímo do vysokoimpedančního vstupu OZ, jsou tak sníženy parazitní úbytky napětí na cestách plošného spoje. Toto řešení je velmi jednoduché, ideálního stavu by šlo dosáhnout pomocí diferenciálního OZ, jelikož by eliminoval i úbytek napětí proti zemnímu vodiči. Výstupní napětí je taktéž přivedeno do analogového přepínače, jenž umožňuje zavedení zpětné napěťové vazby do výstupního výkonového OZ.

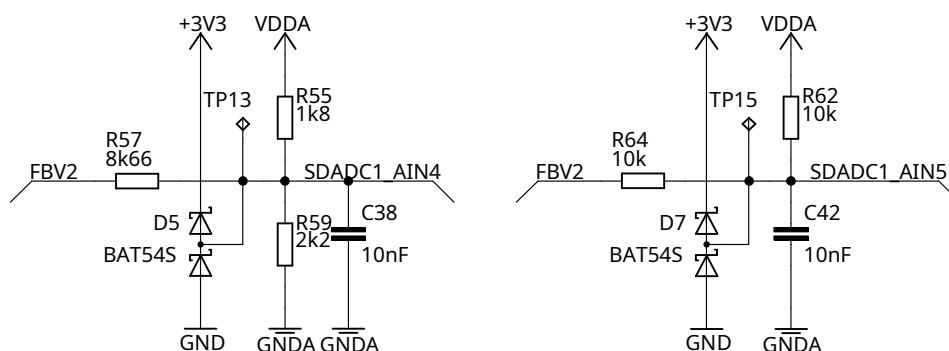
Pro zajištění vyšší přesnosti měření nízkých napětí ($<1,5$ V) je možné pomocí analogového spínače S2 zařadit do obvodu s OZ rezistor R25, OZ tak může zesílit signál přibližně desetinásobně. V případě vypnutého analogového spínače S2 se OZ chová pouze jako buffer, a odděluje tak impedančně měřený prvek od analyzátoru.



Obr. 2.7: Schéma části obvodu zajišťujícího měření výstupního napětí

2.1.5 Napěťové děliče pro mikrokontrolér

Napěťové děliče dvojího druhu na obr. 2.8 snižují napětí do přijatelné meze $0 \div 3,3$ V pro A/D převodník uvnitř mikrokontroléru. Vstupní napětí do děliče může být i záporné, jelikož je děleno vůči kladnému referenčnímu napětí A/D převodníku. Rušivé vysokofrekvenční složky jsou potlačeny dolní propustí, ta je tvořena kondenzátorem a samotnými rezistory děliče. Ochrana vůči přepětí nebo podpětí je zajištěna dvojicí rychlých schottkyho diod s malým úbytkem napětí implementována v jednom SOT-23-3 pouzdře.



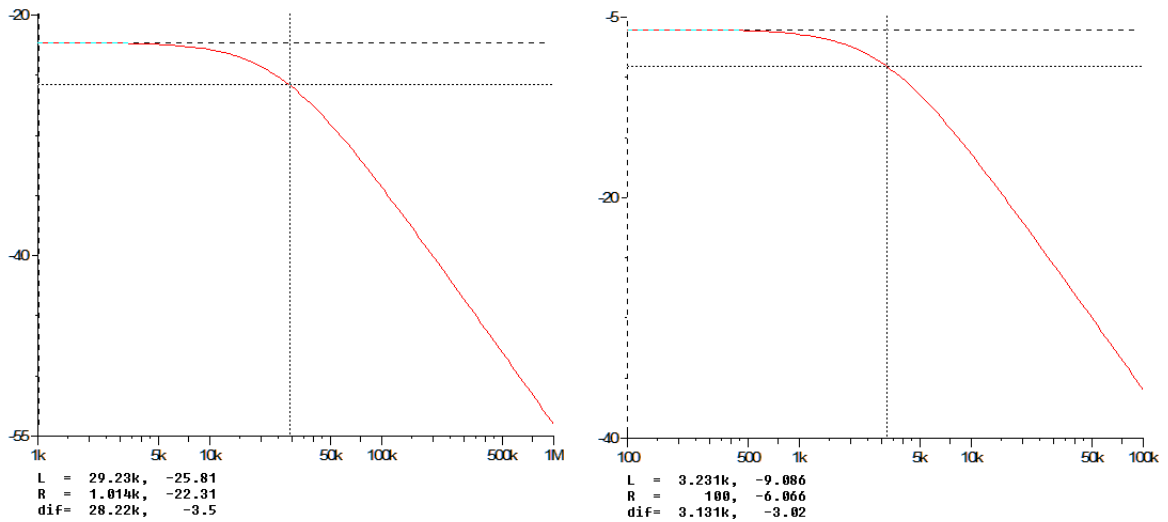
Obr. 2.8: Schéma napěťových děličů

V levé části se nachází dělič pro napěťový rozsah ± 15 V. Výpočet hodnot součástek vychází z rovnice 2.1, která byla získána metodou uzlových napětí. Hodnoty rezistorů děliče v pravé části pro rozsah $\pm 3,3$ V byly vypočteny stejnou metodou z rovnice 2.2.

$$U_{\text{SDADC}\pm 15\text{V}} = \frac{\frac{U_{\text{FBV}}}{R_{57}} + \frac{U_{\text{VDDA}}}{R_{55}}}{R_{55}^{-1} + R_{59}^{-1} + R_{57}^{-1}} = \frac{\frac{U_{\text{FBV}}}{8660} + \frac{3,3}{1800}}{1800^{-1} + 2200^{-1} + 8660^{-1}} = 1.6288 + 0.102591U_{\text{FBV}} \quad (2.1)$$

$$U_{\text{SDADC}\pm 3,3\text{V}} = \frac{\frac{U_{\text{FBV}}}{R_{64}} + \frac{U_{\text{VDDA}}}{R_{62}}}{R_{62}^{-1} + R_{64}^{-1}} = \frac{\frac{U_{\text{FBV}}}{10000} + \frac{3,3}{10000}}{10000^{-1} + 10000^{-1}} = 1.65 + 0.5U_{\text{FBV}} \quad (2.2)$$

Z rovnic je zřetelný účel, výstupní napětí je rovno násobku dělicí konstanty se vstupní hodnotou a posunuto přibližně do poloviny ($3,3/2=1,65\text{V}$) rozsahu A/D převodníku. Pro všechny kondenzátory, které jsou součástí děličů byla zvolena kapacita 10 nF. Mezní kmitočet děliče byl poté zjištěn ze závislosti útlumu na kmitočtu obr. 2.9 programem SNAP v bodě, kde útlum poklesl o 3 dB. Pro $\pm 15\text{ V}$ dělič vyšel mezní kmitočet 28 kHz a pro $\pm 3,3\text{ V}$ dělič 3,13 kHz. Tyto kmitočty se nacházejí hluboko pod předpokládanými rušivými kmitočty způsobenými okolním rušením, zejména pak ze spínaného zdroje.



Obr. 2.9: Mezní kmitočty děličů

2.1.6 Digitální část

Jádrem analyzátoru je mikrokontrolér zabezpečující nejen řízení měřicích zdrojů, ale také umožňující komunikaci s počítačem skrze rozhraní USB. Napájení mikrokontroléru je realizováno pomocí lineárního stabilizátoru LP5912, který se vyznačuje nízkým šumem a dobrou stabilitou. Pro zajištění přesnosti analogové části mikrokontroléru byl vybrán referenční zdroj LM4050CEX3-3 poskytující napětí o velikosti 3,3 V. Toto napětí je také přivedeno do napěťových děličů.

Byl vybrán mikrokontrolér STM32F373C8 s jádrem Cortex-MX zahrnujícím jednotku pro práci s plovoucími desetinnými čísly, celými čísly a datovými typy. Pro uložení programu podporuje zabudované rychlé paměti flash s kapacitou 64 Kib a pro paměť dat až 16 Kib SRAM. Všechny mikrokontroléry této řady mají podporu 12 bitových analogově digitálních převodníků včetně dvou digitálně analogových převodníků. Tento mikrokontrolér taktéž obsahuje tři 16 bitové sigma delta ADC převodníky. Velkou výhodou je podpora USB jak v režimu zařízení, tak v režimu hosta [5].

Interakce s uživatelem je prováděna výhradně pomocí externího počítače skrze rozhraní USB. V případě potřeby je na desce osazeno tlačítko pro reset mikrokontroléru, například během programování, nebo jej lze využít pro uvedení analyzátoru do výchozího stavu. Pro odladění správné funkce a indikaci běhu programu lze využít zapojenou červenou LED diodu.

2.1.7 Souhrn režimů měření

V předchozích subkapitolách byly představeny jednotlivé části měřících zdrojů. Rozdílnou kombinací konfigurace obvodů lze dosáhnout mnoha režimů. Režim zdroje napětí umožňuje celkem až 32 možných konfigurací, viz tabulka 2.3, které se liší nejen výstupním rozsahem, ale i rozsahem zpětného měření napětí / proudu. Obdobným způsobem je na tom režim zdroje proudu, viz tabulka 2.4, který má 16 možných konfigurací.

Tab. 2.3: Přehled režimů zdroje napětí

A	B	C	SHU- NT	MO- DE	GV	GC	U_{out} max	I_{in} max	U_{in} max GV=0	U_{in} max GV=1
0	0	0	0	0	x	1	3,3V	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3V$ & $\pm 15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	1	0	0	0	x	1	15V	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	0	0	0	0	x	1	-15V	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	0	0	x	1	-3,5V	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	0	0	x	0	3,3V	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	1	0	0	0	x	0	15V	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	0	0	0	0	x	0	-15V	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	0	0	x	0	-3,5V	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	1	0	x	1	3,3V	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	1	0	1	0	x	1	15V	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	0	0	1	0	x	1	-15V	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	1	0	x	1	-3,5V	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	1	0	x	0	3,3V	$\pm 330mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	1	0	1	0	x	0	15V	$\pm 330mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	0	0	1	0	x	0	-15V	$\pm 330mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	1	0	x	0	-3,5V	$\pm 330mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$

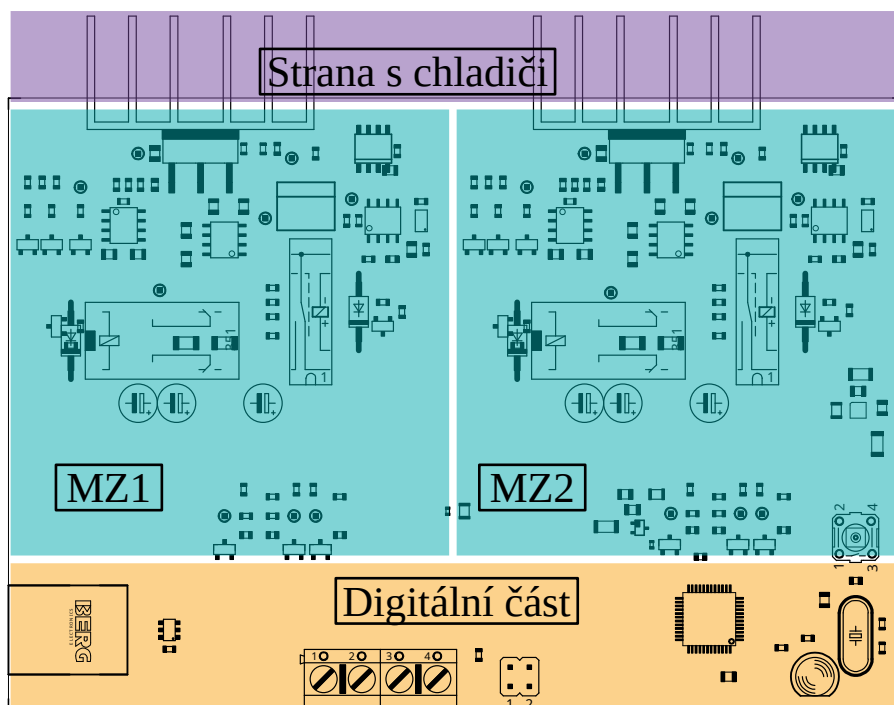
Tab. 2.4: Přehled režimů zdroje proudu

A	B	C	SHU- NT	MO- DE	GV	GC	I_{out} max	I_{in} max	U_{in} max GV=0	U_{in} max GV=1
0	0	0	0	1	x	1	300uA	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	0	1	x	0	3,3mA	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	1	1	x	1	33mA	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
0	0	0	1	1	x	0	330mA	$\pm 330mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	0	1	x	1	-300uA	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	0	1	x	0	-3,3mA	$\pm 3,3mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	1	1	x	1	-33mA	$\pm 33mA$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$
1	1	1	1	1	x	0	-330mA	$\pm 330\mu A$	$\pm 3,3$ & $15V$	$\pm 0,33$ & $1,5V$

2.2 Návrh plošného spoje

Původní plán počítal se čtyřvrstevným plošným spojem vyrobeným na zakázku ve firmě JLCPCB, která nabízí rychlou a levnou službu. Plán překazila celostátní krize, kdy hrozilo značné zpoždění zásilky. Realizace analyzátoru byla proto provedena v domácích podmínkách na oboustranném plošném spoji z materiálu FR4. Prokovy byly realizovány přiletováním kousku měděného drátku na obou stranách. V některých částech prokovy tvoří přímo drátové vývody součástek.

Strana součástek se výhradně nachází na horní straně desky, na spodní straně byla snaha vymezit prostor pro rozlití zemí. Plošný spoj lze rozdělit na 4 části obr. 2.10. V zadní části plošného spoje je vymezen prostor pro chladiče, v prostření části se nachází dvojice měřicích zdrojů. Ve spodní části se nachází digitální část s mikrokontrolérem a USB konektorem. Tato topologie byla zvolena z důvodu potřeby rozdělení analogové a digitální země.



Obr. 2.10: Vymezení částí plošného spoje

2.3 Způsob práce s analyzátozem

Před zahájením měření je zapotřebí zjistit základní parametry tranzistoru. Především, o jaký typ se jedná, včetně rozmístění jednotlivých elektrod z pouzdra. Aby analyzátor tranzistor nezneškodil, je třeba zjistit mezní napětí a proudy. Je na uživateli rozmyslet si, která elektroda bude brána během měření jako společná.

Po připojení externího napájení analyzátoru a propojení skrze USB rozhraní s počítačem je zapotřebí provést synchronizaci komunikace. Pokud je úspěšná, uživatel připojí tranzistor k analyzátoru (vlození do patice, připojení krokosvorek apod.). V aplikaci vybere požadovaný druh analýzy včetně zadání parametrů a zahájí měření. Na obrazovce se tak vykreslí naměřené průběhy a zjištěné základní parametry, které je možné exportovat, a využít tak ve své vlastní aplikaci (například návrh tranzistorového zesilovače) nebo jako demonstrace funkce tranzistoru.

2.4 Napájení analyzátoru

Během návrhu napájecího zdroje byl kladen důraz především na jednoduchou konstrukci. Prvotní plán počítal s použitím transformátorů a usměrňovacích můstků. Výsledná konstrukce by však byla nákladná a dosahovala by vyšší hmotnosti. V síti se taktéž mohou nacházet různá nepředpokládaná rušivá vysokofrekvenční napětí, která by se mohla dostat až do cílového zařízení. Proto byl zvolen jako hlavní napájecí zdroj adaptér určený původně pro notebooky, poskytující stejnosměrné napětí 19 V odstíněné od síťového napětí. Na konkrétním výrobci příliš nezáleží, důležité je jmenovité napětí, výkon, funkčnost a bezpečnost adaptéru, která by měla být ověřena přímo výrobcem. Zbývá tak vyřešit pouze část, která převede výstupní napětí z adaptéru na potřebná napětí pro analyzátor. Jelikož potřebný zdroj napájí zařízení určené pro citlivé laboratorní měření, je kladen důraz na stabilní napájecí napětí s nízkým šumem. Proto byla zvolena kombinace spínaného a lineárního zdroje.

Celý zdroj je postaven na samostatném plošném spoji. Schéma zdroje se nachází v příloze A.

2.4.1 Návrh spínané části

Jelikož se zde pracuje s malými výkony, byl zvolen návrh typu fly-back. Charakteristikou tohoto zapojení je nízký počet součástek a možnost vícero výstupních napětí. Základní prvek spínané části tvoří kontrolér UC3843 (IC4), který je určen pro konverzi napětí typu DC/DC. Vnitřek tohoto kontroléru tvoří soustava komparátorů a digitálních hradel, jež díky zpětným vazbám reguluje výstupní napětí pomocí změny střídý a kmitočtu. Napájení tohoto obvodu zajišťuje napěťový dělič realizovaný rezistorem R3 a zenerovou diodou D6, na níž je v závěrném směru úbytek 18 V. Transformaci napětí zajišťuje feritový transformátor, který je zde použit jako akumulací prvek. Při sepnutí tranzistoru Q1 dochází k sycení jádra transformátoru, po rozepnutí nakumulovaná energie odchází sekundárním vinutím skrze blokující diody. Díky použití vysokých kmitočtů tak použitý transformátor dosahuje podstatně menších rozměrů než klasické železné síťové transformátory.

Nejnižší pracovní kmitočet měniče byl zvolen přibližně 80 kHz. Generování tohoto průběhu je zajištěno pomocí oscilátoru uvnitř kontroléru. Jedinou částí oscilátoru, která se nachází mimo kontrolér, je RC člen tvořený rezistorem R6 a kondenzátorem C22. Volbou hodnot těchto prvků lze nastavit pracovní kmitočet. Vztah je popsán empirickým vzorcem z dokumentace [7]. Hodnoty byly vybrány z aktuálních dostupných zásob.

$$f = \frac{1,81}{R \cdot C} = \frac{1,81}{10000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}} = 82272 \text{ kHz} \quad (2.3)$$

Jak už bylo zmíněno, transformace energie spočívá v akumulaci (sycení) a opětovném uvolnění energie z jádra transformátoru. Sycení transformátorového jádra je zajištěno unipolárním tranzistorem Q1, který je opatřen chladičem. Velikost a typ chladiče byl zvolen na základě zkušeností. Během provozu nepřekročila teplota na chladiči v maximální zátěži 30 °C. Chladič se tedy jeví jako dostačující. Tranzistor samotný bez patřičných ochranných opatření by se časem mohl zničit. Maximální mezní napětí mezi G-S tranzistoru je 20V, proto byla zapojena zenerova dioda D7 s úbytkem 18 V mezi gate zem. Dalším nebezpečím jsou rázové proudy do gate tranzistoru, protože přechod G-S vykazuje kapacitní charakter. Rázové proudy jsou tak tlumeny rezistorem R7. Rezistor R12 tak slouží pro zamezení sepnutí tranzistoru v případě neosazení kontroléru, zároveň taktéž usnadňuje vypnutí tranzistoru.

Regulace výstupního napětí je zajištěna komparátorem uvnitř kontroléru. Jeho vstupem je referenční napětí o velikosti 2,5 V a zpětná vazba z výstupní svorky měniče. Protože vstupní napětí komparátoru musí být shodná, je v zpětné vazbě zapojen dělič napětí složený z rezistorů R15, R9 a potenciometru R8. Velikost výstupního napětí lze měnit potenciometrem R8, v rozsahu 16,6 V až 23,01 V. Výpočet minimálního možného napětí popisuje rovnice 2.4, maximální napětí lze vypočítat

z rovnice 2.5. Výsledné požadované napětí by mělo být o 2,5 V vyšší než je výstupní napětí lineárních stabilizátorů. Tento napěťový rozdíl je potřeba pro správnou funkci lineárních stabilizátorů. V našem případě je stabilizátor v hlavní výstupní větvi pevně nastaven na 18 V, tudíž požadované výstupní napětí spínaného zdroje na hlavní větvi činí 20,5 V.

$$U_{outmin} = U_{fb} \frac{R_9 + R_{15}}{R_9} = 2,5 \frac{3900 + 22000}{3900} = 16,6 \text{ V} \quad (2.4)$$

$$U_{outmax} = U_{fb} \frac{R_9 + R_8 + R_{15}}{R_9} = 2,5 \frac{3900 + 10000 + 22000}{3900} = 23,01 \text{ V} \quad (2.5)$$

Pro správnou funkci měniče je taktéž nutné zavedení proudové zpětné vazby do kontroléru, jež zamezuje přetížení sycení jádra transformátoru a zničení tranzistoru. Snímání proudu primárním vinutím transformátoru je zajištěno dvojicí paralelně zapojených rezistorů (bočníku) (R13, R14). Procházející proud vyvolá na rezistorech úbytek napětí, které je přímoúměrné procházejícímu proudu. Použití dvojice rezistorů je čistě z důvodu nedostupnosti potřebné hodnoty na trhu. Procházející proud rov. 2.8, a tudíž i velikost odporu bočníku se odvíjí od celkového výkonu rovnice 2.6 a střídá. Střídá signálu se zase odvíjí od vstupního a výstupního napětí rovnice 2.7. Výsledný odpor z vypočítaného špičkového proudu je dopočítán empirickým vzorcem 2.9 z dokumentace [7].

$$P_{tot} = (|U_{s1} \cdot I_{s1}| + |U_{s2} \cdot I_{s2}| + |U_{s3} \cdot I_{s2}|) \cdot 2 = (20,5 \cdot 0,4 \cdot 2 + 5 \cdot 0,2) \cdot 2 = 30 \text{ W} \quad (2.6)$$

$$s = \frac{U_p}{U_p + U_s} = \frac{19}{19 + 20,2} = 0,6552 \quad (2.7)$$

$$I_{peak} = \frac{2 \cdot P_{tot}}{s \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 30}{0,66552 \cdot 10} = 9,1579 \text{ A} \quad (2.8)$$

$$R_{R13||R14} = \frac{0,83}{I_{peak}} = \frac{0,83}{9,1579} = \underline{90 \text{ m}\Omega} \quad (2.9)$$

Použitý feritový transformátor s jádrem typu EE byl získán z nefunkčního spínaného zdroje. Maximální výkon transformátoru lze získat z dokumentace nebo odhadem na základě průřezu středního sloupku feritového jádra. Jelikož původní zařízení bylo schopno dodávat 150 W, bylo usouzeno, že v této aplikaci při 30 W bude transformátor dostačující. Jelikož původní zařízení pracovalo s zcela jinými parametry, bylo potřeba navinout vlastní potřebný počet závitů. Rozebrání jádra bylo provedeno ověřeným způsobem ve vroucí vodě po dobu pěti minut.

Výpočet potřebného počtu závitů závisí na mnoha parametrech. Mezi jeden z parametrů patří velikost vzduchové mezery v jádře transformátoru. Tu lze realizovat vrstvami vhodné izolační pásky (například kapton). Jelikož dosažení potřebné mezery bývá obtížné, byl nejprve vypočítán přibližný počet závitů a velikost vzduchové

mezery podle rovnic: 2.10 a 2.11. Poté se na základě úsudku a výběru velikosti vzduchové mezery vypočítá finální počet závitů viz rovnice: 2.12,2.13,2.14. Navíjení transformátoru bylo provedeno v jednom směru na originální plastové kostřičce. Prvně byla navinuta polovina primárního vinutí, poté trojice sekundárních vinutí a nakonec druhá polovina primárního vinutí. Všechny vrstvy byly vzájemně od sebe izolovány izolační páskou. Průměr vodiče se odvíjí od protékajícího proudu. Nejvyšším proudem je zatěžováno primární vinutí. Průměr je vypočítán rov. 2.17 ze známé poučky pro měď 10 A/mm^2 a úpravy vzorce pro výpočet obsahu kruhu. Musíme však počítat s průměrným protékajícím proudem, nikoliv s proudem špičkovým, průměr vodiče by tak vyšel zbytečně velký.

$$N_{p'} = \frac{s \cdot U_n}{f \cdot B_{max} \cdot S_j} = \frac{0,6552 \cdot 10}{82000 \cdot 0,2 \cdot 0,00001868} = 21,3863 \text{ závitů} \quad (2.10)$$

$$I_{v'} = \frac{\mu_0 \cdot N_{p'} \cdot I_p}{B_{max}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 21 \cdot 9,1579}{0,2} = 1,2 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$N_p = \sqrt{\frac{s^2 \cdot U_n^2 \cdot l_v}{2 \cdot f \cdot P \cdot \mu_0 \cdot S_j}} = \sqrt{\frac{0,6552^2 \cdot 10^2 \cdot 0,0000012}{2 \cdot 82000 \cdot 30 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,00001868}} = 21 \text{ závitů} \quad (2.12)$$

$$N_{s \pm 20,5 \text{ V}} = N_p \frac{U_s}{U_p} = 21 \frac{20,5}{19} = \underline{22 \text{ závitů}} \quad (2.13)$$

$$N_{s+7,5 \text{ V}} = N_p \frac{U_s}{U_p} = 21 \frac{7,5}{19} = \underline{8 \text{ závitů}} \quad (2.14)$$

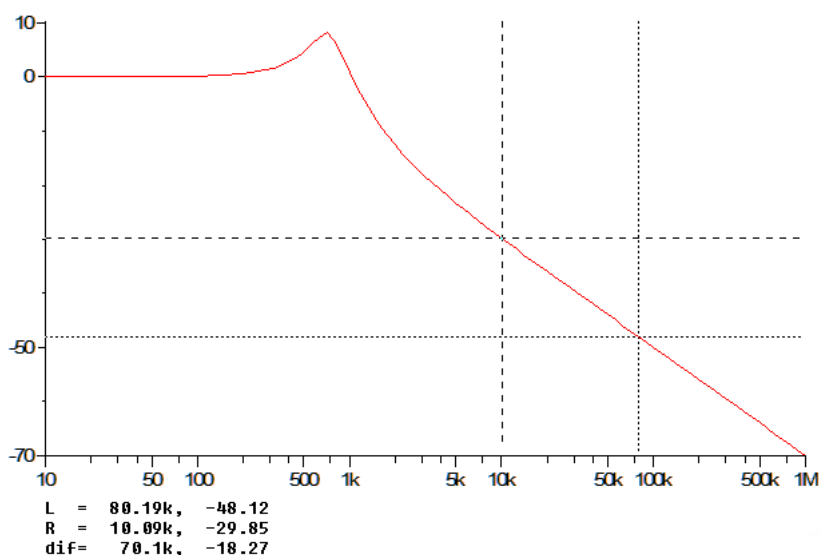
Průměr vodiče se odvíjí od průměrného proudu.

$$I_{fp} = I_p \sqrt{\frac{s}{3}} = 4,28 \text{ A} \quad (2.15)$$

$$d_{min} (\text{mm}) = 2 \sqrt{\frac{I_{fp}}{10 \cdot \pi}} = 2 \sqrt{\frac{4,28}{10 \cdot \pi}} = \underline{0,73 \text{ mm}} \quad (2.16)$$

2.4.2 Návrh lineární části

Blokující diody za sekundárním vinutím transformátoru usměrňují napětí společně s kondenzátory C2,C8,C14. Výsledný průběh napětí však není úplně hladký, navíc obsahuje značný šum (cca. 50 mVpp). Proto je dále zařazena v sekundární části obvodu dvojice filtrů tvořená prvky L1,L2,C1,C7,C13,C2,C8,C14. Induktor L2 filtru pro symetrickou část napájecího napětí je realizován dvojím vinutím na toroidním jádře. Rušivé vysokofrekvenční proudy se tak v jádře vzájemně odečtou a neprocházejí tak do dalších citlivých obvodů. Zároveň zde platí pravidlo, že ideální cívkou prochází bez odporu pouze stejnosměrný signál. Induktor větve o napětí 7,5 V je taktéž navinut na toroidním jádře, ale pouze s jedním vinutím, a funguje tak jako LC článek. Dle simulace na obr. 2.11 z programu SNAP, je útlum obou filtrů na kmitočtu 80 kHz přibližně -48 db.



Obr. 2.11: Útlum LC filtru

Spínaný zdroj nesmí pracovat naprázdno, jelikož by se tak stal nestabilním. Z tohoto důvodu jsou za filtry zapojeny rezistory (R1,R2,R4) sloužící jako zátěž. Celkové ztráty podle rov. 2.17 tak na těchto rezistorech činí přibližně 1 W.

$$P_{load} = \frac{U_{out1}^2}{R_{out1}} + \frac{U_{out2}^2}{R_{out2}} + \frac{U_{out3}^2}{R_{out3}} = \frac{7,5^2}{100} + \frac{20,5}{1000} + \frac{(-20,5)^2}{1000} = 1,0905 \text{ W} \quad (2.17)$$

Jelikož regulace probíhá pouze na základě proudové zpětné vazby primárním vinutím a zpětné napěťové vazby z 20,5 V větve, poslední překážkou tak zůstává především stabilita a přesnost výstupního napětí na ostatních větvích, bylo tedy důležité navinout správný počet závitů. Velké napěťové rozdíly taktéž může vyvolat

nesymetrická zátěž, kde například zatížením 20,5 V větve vzroste napětí na 5 V větvi. Proto byly dále zařazeny lineární stabilizátory s pevně nastaveným výstupním napětím. Ty zajistí jednak stabilní napětí, ale uplatní se taktéž jako další přídavný filtr. Dle dokumentace stabilizátory mají na kmitočtu 80 kHz útlum až -40 db. Úbytek napětí na stabilizátoru a procházející proud vyvolá ztráty ve formě tepla. Je tedy nezbytné zajistit dostatečné chlazení stabilizátorů. Teplota čipu stabilizátoru se odvíjí od tepelného odporu pouzdra a chladiče při okolní teplotě. Vybraný chladič RAD-DY-GF/3 z e-shopu TME má tepelný odpor 8,8 °C/W [9]. Na základě výpočtu ze vztahu 2.18 vyplývá, že při maximální zátěži by teplota neměla překročit 45 °C.

$$T = T_0 + U_{78xx} \cdot I_{out} \cdot \frac{\theta_{j-a} \cdot (\theta_{j-c} + \theta_{h-a})}{\theta_{j-a} + (\theta_{j-c} + \theta_{h-a})} = 30 + 2,5 \cdot 0,5 \cdot \frac{70 \cdot (5 + 8,8)}{70 + (5 + 8,8)} = 45^\circ\text{C} \quad (2.18)$$

2.4.3 Konstrukce

Zdroj je postaven na samostatném jednovrstvém plošném spoji aby jej bylo případně možné nahradit jiným například laboratorním zdrojem. Zdroj je také možné oddělit navíc plechovými přepážkami nebo vzdáleností od analyzátoru. Zvláště z důvodu generování velmi rušivých vysokofrekvenčních elektromagnetických polí transformátorem. Tato pole mohou snadno vyvolat indukci rušivých proudů v citlivých obvodech a znehodnotit tak měření. Pro připojení napájecích vodičů slouží dvojice svorkovnic. Chladiče stabilizátorů se nacházejí na zadní části desky, aby tak později bylo snadnější zajištění průchodu vzduchu uvnitř přístrojové krabičky. Fotografie zdroje se nachází v příloze F.

2.4.4 Uvedení do provozu

Po osazení všech komponent (kromě lineárních regulátorů) je nutné zajistit, že se na plošném spoji nenacházejí nežádoucí cínové kuličky, mohli by tak některé části obvodu zkratovat. Po připojení napájecího napětí o velikosti 19 V z vhodného adaptéru pro notebooky, by měl obvod pracovat na první pokus. Neměly by se ozývat žádné hlasité zvuky z transformátoru. Poté by měla přijít na řadu kontrola výstupních napětí na zátěžích. Další část obvodu, která by měla být prověřena, je průběh napětí U_{GS} na spínacím tranzistoru Q1, špičkové napětí by nemělo překračovat napětí 50V. Kmitočet průběhu napětí by měl být okolo pracovního kmitočtu na 82 kHz. V případě správné funkce spínané části můžeme přistoupit k osazení lineárních regulátorů společně s chladiči. Opět přichází na řadu kontrola výstupního napětí a úrovně šumu.

3 Softwarové vybavení

Software představuje nedílnou součást moderních výrobků. Výhodou je snadná a levná možnost program kdykoliv upravit. Byla vytvořena aplikace pro počítač, kterou je možné analyzátor ovládat a odměřovat charakteristiky tranzistorů. Dalším softwarem je firmware pro mikrokontrolér, jenž zajišťuje komunikaci a měření.

3.1 Firmware mikrokontroléru

Firma ST poskytuje pro snadné prototypování aplikaci STM32CubeIDE, ve které je možné na základě požadavků v grafickém prostředí vybrat vhodný typ mikrokontroléru a následně provést konfiguraci samotné budoucí inicializace. Poté stačí nechat nástroj vygenerovat zdrojové kódy, které obsahují vše potřebné pro počáteční nastavení. Není tedy nutné tolik detailně studovat dokumentaci mikrokontroléru a zjišťovat konkrétní názvy a způsoby konfigurace registrů. Kromě konfigurace funkce jednotlivých vývodů a zdroje taktovacího signálu je rovněž možné zahrnout knihovny pro práci s USB rozhraním. Tyto knihovny posléze zajišťují, že se mikrokontrolér připojený k počítači tváří jako virtuální sériový port. Výsledná efektivita vygenerovaného kódu není moc dobrá, ale pro tuto aplikaci ji lze považovat za dostačující. Velkým problémem je totiž využití HAL knihoven, které sice přinášejí výhodu teoretické přenositelnosti, avšak jsou příliš rozsáhlé.

Původní záměr programu pro mikrokontrolér byl, aby topologii obvodu měnil automaticky dle aktuální potřeby. Při pokusu implementovat vše v jazyce C se to ukázalo jako časově náročné. Problém činilo napsání string parseru pro virtuální sériovou komunikaci a interpolace kalibračních křivek. Největší úskalí však bylo pomalé nahrávání programu a následný debug, hrozilo tak nesplnění termínu. Byl tak zvolen kompromis, kde mikrokontrolér plní funkci pasivního digitálně-analogového rozhraní. Obsahem komunikace nejsou tedy pokyny s vysokou úrovní abstrakce (myšleno příkazy typu "nastav zdroj číslo jedna na 20 mA"), ale pokyny pro zápis hodnoty pro D/A převodníky, čtení surových hodnot z A/D převodníků, pokyny pro aktivaci/deaktivaci digitálních výstupů. Abstrakci tedy musí zajistit teprve až aplikace v počítači, kde byla implementace mnohem méně časově náročná.

3.1.1 Komunikační protokol

Komunikace probíhá pomocí krátkých znakových řetězců (paketů) zakončených znakem nového řádku '\n'. Po zaslání paketu, v případě správného spojení, následuje vždy příjem odpovědního paketu. Pro kontrolu správného spojení mezi aplikací v počítači a HW analyzátoru je vhodné na začátku komunikace provést synchronizaci. Ta se provede zasláním několika paketů 'ping', jenž by měli následovat odpovědi 'OK'. Tabulka 3.1 popisuje souhrn všech možných pokynů pro analyzátor.

Tab. 3.1: Souhrnná tabulka možných pokynů

Pokyn *2	Účel	Odpověď
ping	Bez operace	OK
debug a<id> <1/0>	Aktivuje/Deaktivuje výstup A	OK
debug b<id> <1/0>	Aktivuje/Deaktivuje výstup B	OK
debug c<id> <1/0>	Aktivuje/Deaktivuje výstup C	OK
debug shunt<id> <1/0>	Aktivuje/Deaktivuje výstup SHUNT	OK
debug gc<id> <1/0>	Aktivuje/Deaktivuje výstup GC	OK
debug sdadc<id>	Vyžádá hodnoty z A/D převodníků	*1
debug dac<id> <hodnota12>	Provede konverzi A/D převodníku	OK
<chybná syntaxe>	Bez operace	ERROR
Poznámka k formátování:	Znaky < > nejsou součástí syntaxe !	
<id>	Číslo zdroje 1 nebo 2	
<hodnota12>	12ti bitová bezznaménková hodnota	
<sdadc?#?>	16ti bitová hodnota se znaménkem	

*1: <sdadc3#7> <sdadc3#8> <sdadc3#6> <sdadc1#4> <sdadc1#5> <sdadc1#8>

*2: Nezáleží na velikosti písmena

3.2 Ovládací aplikace pro PC

Analyzátor neobsahuje žádné pokročilé rozhraní (display, klávesnice apod.), proto byla vytvořena aplikace pro PC, která tak přináší přívětivé grafické uživatelské rozhraní určené pro ovládání analyzátoru. Aplikace umožňuje manuální ovládání, kde je možné nastavit libovolnou hodnotu výstupního napětí nebo proudu na jednom ze dvou výstupů analyzátoru. Skutečné výstupní napětí a proud včetně aktuálně zvoleného rozsahu jsou zobrazovány průběžně zobrazován uživateli.

Druhá část aplikace umožňuje automatické měření stejnosměrných charakteristik tranzistoru. Uživatel vybere typ tranzistoru a do příslušných polí zadá mezní

hodnoty očekávaných charakteristik. Zahájením měření program automaticky posílá příslušné pokyny analyzátoru, který tak změřené hodnoty zakresluje do grafu, ten po skončení měření je možno uložit pro další zpracování.

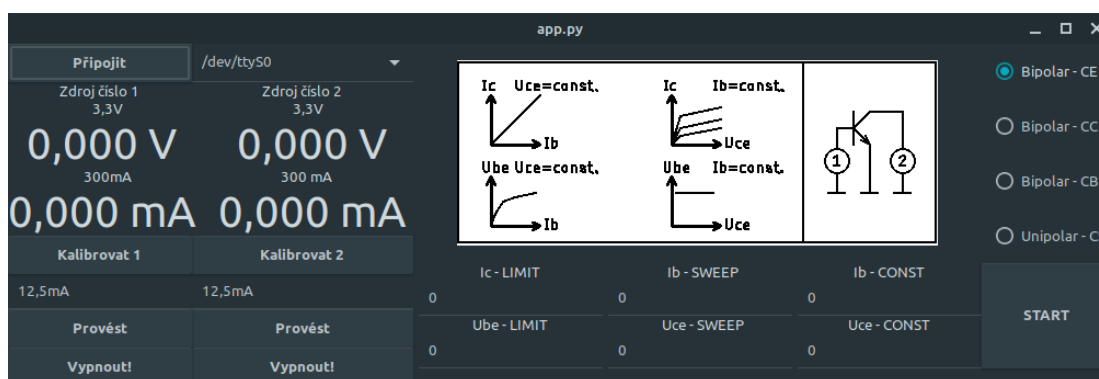
Pro kalibraci analyzátoru je aplikace vybavena průvodcem kalibrace, jenž provádí uživatele krok po kroku.

Původní návrh aplikace měl být realizován v prostředí MATLAB. Po napsání několika stovek řádků kódu se skriptovací jazyk MATLAB ukázal jako vysoce neefektivní, složitost aplikace byla natolik komplexní, že skončila neúspěchem. Především z důvodu absence schopnosti objektového programování a předávání referencí na proměnné.

Program byl tak vytvořen ve free-opensource vysokoúrovňovém skriptovacím programovacím jazyku Python3. Velkou výhodou tohoto objektově orientovaného kódu je snadná přenositelnost programu napříč operačními systémy. I přes fakt, že se jedná o interpret, je výsledný program rychlý, jelikož volané funkce jsou často efektivně implementovány v programovacím jazyce C. Tyto funkce jsou součástí knihoven, které je možné kdykoliv libovolně doinstalovat. Mezi důležité knihovny aplikace pro ovládání přípravku patří knihovna 'serial', jež umožňuje přístup k sériové komunikaci. Pro zobrazování grafů slouží knihovna 'matplotlib', která umožňuje tvorbu grafů podobně jako například MATLAB.

3.2.1 Grafické uživatelské prostředí

Pro snadné ovládání je využita open-source knihovna 'GTK+3', která umožňuje tvorbu okenních aplikací. Rozložení jednotlivých prvků v okenní aplikaci bylo navrženo pomocí grafického nástroje GLADE. Rozložení jakož i ovládání prvků je napříč systémy identické, pouze vzhled závisí na nastavení OS. Na obrázku 3.1 je snímek okna pod operačním systémem Linux Mint s nainstalovaným tmavým vzhledem Adapta-Nokto.



Obr. 3.1: Ovládací aplikace

V levé horní části okna, se nachází ComboBox dostupných sériových portů. Výběrem portu a následně stiskem tlačítka 'Připojit' dojde k navázání spojení s analyzátozem.

Pod touto dvojicí prvků se nachází dvojice sloupců pro manuální ovládání měřících zdrojů. V horní části sloupce se zobrazují aktuální skutečné výstupní hodnoty napětí a proudu včetně automaticky zvoleného rozsahu. Tlačítkem 'Kalibrovat' lze zahájit poloautomatickou kalibraci měřícího zdroje. Pod tlačítkem se nachází pole pro manuální vstup požadované výstupní hodnoty (napětí nebo proudu), zápis se provádí stiskem tlačítka 'Provést'. Tlačítkem 'Vypnout!' lze kdykoliv uvést měřící zdroj do vypnutého stavu.

V prostřední části okna se nachází pomocný obrázek pro obsluhu, který znázorňuje náčrt měřených průběhů a schéma zapojení. Pod obrázkem se nachází 6 vstupních polí pro vymezení měřených rozsahů.

Pro změnu typu měření se v pravé části nachází čtveřice přepínačů. Tlačítkem 'START' lze zahájit měření.

3.2.2 Způsob provedení kalibrace analyzátoru

Analyzátor může pracovat v mnoha režimech. Pro každý režim je zapotřebí, aby aplikace znala příslušné kalibrační průběhy. Tyto průběhy popisují vztahy mezi digitálními hodnotami z DA/AD převodníků a skutečnou hodnotou výstupního napětí / proudu. Těchto průběhů je skutečně mnoho. Bylo by zdouhavé každou odměřit manuálně zvlášť. Byl proto vymyšlen způsob jak kalibraci zjednodušit.

Uživatel nejprve odměří čtyři napěťové charakteristiky na malé zátěži. Použitý voltmetr musí být co nepřesnější, jelikož se od něj odvíjí další měření. Program analyzátoru na základě těchto křivek, je poté schopen přesně měřit výstupní napětí.

Zbývá tak získat kalibrační průběhy pro měření proudu. Jejich získání je provedeno poloautomatickým způsobem. Připojením etalonu odporu lze dopočítat kalibrovaný proud na základě známého napětí. Jako etalon posloužila sada čtyř obyčejných uhlíkových rezistorů. Během kalibrace se průvodce zeptá na skutečnou hodnotu odporu a analyzátor poté proměří příslušný rozsah proudu. Rezistory tak nemusejí být přesné a mohou mít i odchylku 5%.

Posledním krokem je závislost výstupního napětí / proudu na hodnotě D/A převodníku. Do této doby totiž analyzátor generoval D/A převodníkem přeběh od nulové do maximální hodnoty. Měření napětí a proudu byl zkalibrováno, nic tedy nebrání připojení vhodné malé zátěže a projít tak všechny možné konfigurace. Tento krok je již po připojení zátěže pro všechny rozsahy plně automatický.

4 Demonstrační úloha

4.1 Cíle úlohy

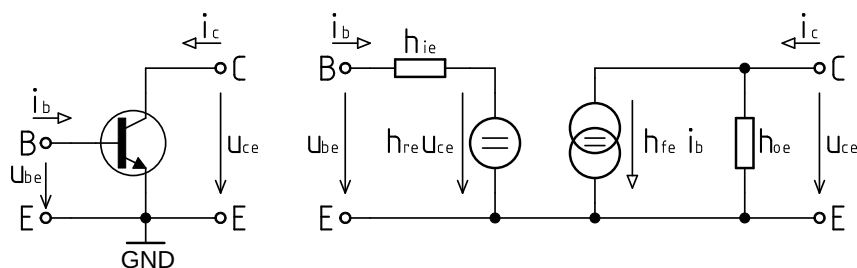
- Pochopit linearizovaný model tranzistoru v zapojení se společným emitorem
- Pochopit význam h-parametrů
- Srovnat výsledky simulací s reálným měřením

4.2 Teoretický úvod

Tranzistor je polovodičová třívývodová součástka, která se nejčastěji používá v zesilovačích. Zapojit ji lze tak celkem třemi možnými způsoby. V této úloze si prakticky vyzkoušíte zapojení se společným emitorem.

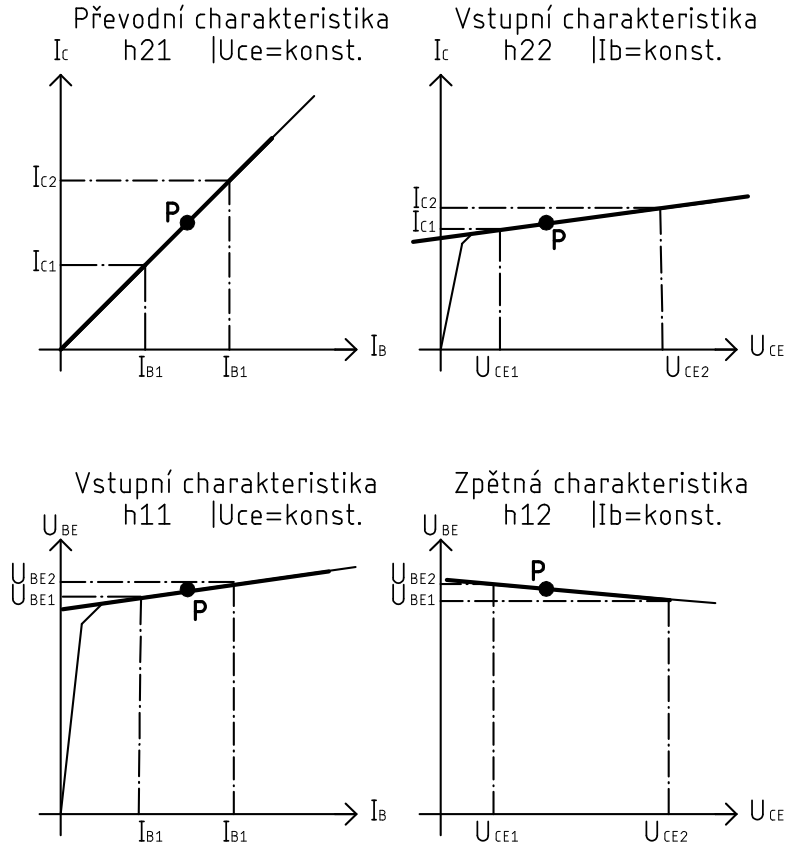
Základní vlastností tranzistoru je schopnost malou změnou vstupního proudu provádět velké změny proudu na výstupu. Samotný tranzistor nedokáže pracovat samostatně, musí být napájen externím zdrojem napětí. Napájení lze provést pomocí vhodně zapojených rezistorů, tranzistor se tak nastaví do pracovního bodu. Oddělení stejnosměrné složky zajišťují do série zapojené kondenzátory.

Chování tranzistoru pomocí rovnic fyzikálního popisu je náročné. Jelikož se nejčastěji pracuje se signály, které se pohybují pouze v okolí pracovního bodu, lze popis zjednodušit tak, že se chování tranzistoru v tomto bodě popíše lineárním náhradním modelem viz obr. 4.1. Lineární model tranzistoru je tedy dvojbran, kde vzájemné vztahy mezi porty popisují konstanty známé jako h-parametry. Na vstupu se tranzistor chová jako reálný zdroj napětí se zpětným přenosem h_{12} a vstupním odporem h_{11} . Na výstupu zase jako reálný zdroj proudu se zesílením h_{21} a výstupní vodivostí h_{22} .



Obr. 4.1: Náhradní schéma tranzistoru se společným emitorem [2]

Směrnice tečny tvořená tečně na pracovní bod v charakteristice umožňuje odečtení potřebných H-parametrů. Tečnu v daném bodě je možné přibližně vytvořit například pomocí pravítka, jako je tomu ukázáno na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Proložení charakteristik tranzistoru přímkou v pracovním bodě

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ie} = h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{I_{B1} - I_{B2}} [\Omega] \quad | U_{CE} = \text{konst.}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

$$h_{re} = h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} [-] \quad | I_B = \text{konst.}$$

Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fe} = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{B1} - I_{B2}} [-] \quad | U_{CE} = \text{konst.}$$

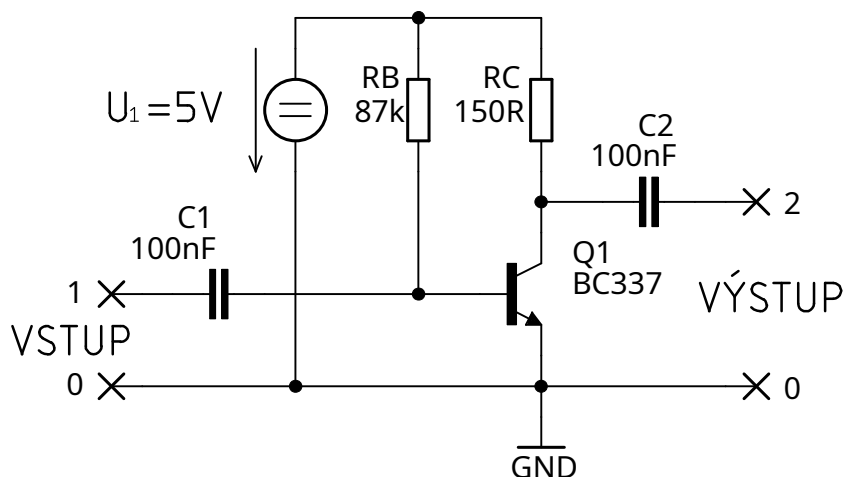
Výstupní vodivost naprázdno:

$$h_{oe} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} [S] \quad | I_B = \text{konst.}$$

4.3 Zadání

Váším úkolem je zjistit základní parametry zesilovače s jedním tranzistorem na obr. 4.3. Odměřte charakteristiky použitého tranzistoru v pracovním bodě pomocí simulátoru P-Spice a ověřte reálným měřením pomocí počítačem řízeného analyzátoru. Ze získaných charakteristik určete H-Parametry tranzistoru. Následně vypočítejte vstupní a výstupní odpor zkoumaného zesilovače se započítáním odporů rezistorů zajišťujících nastavení pracovního bodu.

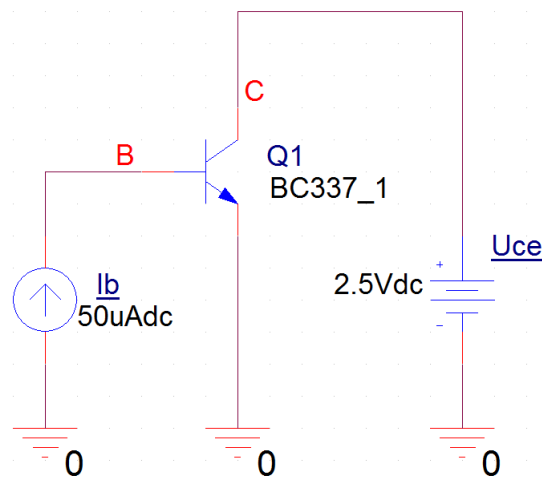
Uvažujte, že kondenzátory průchodu střídavého proudu nekladou žádný odpor a slouží jen jako oddělení stejnosměrné složky. Napětí mezi kolektorem a emitorem je navrženo tak, aby na něm bylo poloviční napájecí napětí. Vypočítejte velikost stejnosměrného proudu, vstupující do báze tranzistoru. Berte v úvahu, že napětí U_{BE} je rovno přibližně 0,65 V.



Obr. 4.3: Schéma tranzistorového zesilovače

4.3.1 Měření charakteristik pomocí simulátoru

Zapněte počítač, spusťte program P-SPICE. Založte nový projekt File->New->Project. Vyberte první možnost 'PSpice Analog or Mixed A/D', zvolte si název projektu a stiskněte 'OK'. V pravé části okna 'Place Part' vyhledejte součástku 'BC337' a vložte do schématu. Obdobným způsobem vložte zdroj napětí 'Vdc/SOURCE' a proudu 'Idc/SOURCE'. Zem vložte pomocí klávesové zkratky 'G', stiskněte OK a značku položte. Propojte zapojení vodiči (klávesová zkratka W) podle schématu z programu P-Spice na obr. 4.4. Vodiče pojmenujte za pomocí klávesové zkratky 'N'.

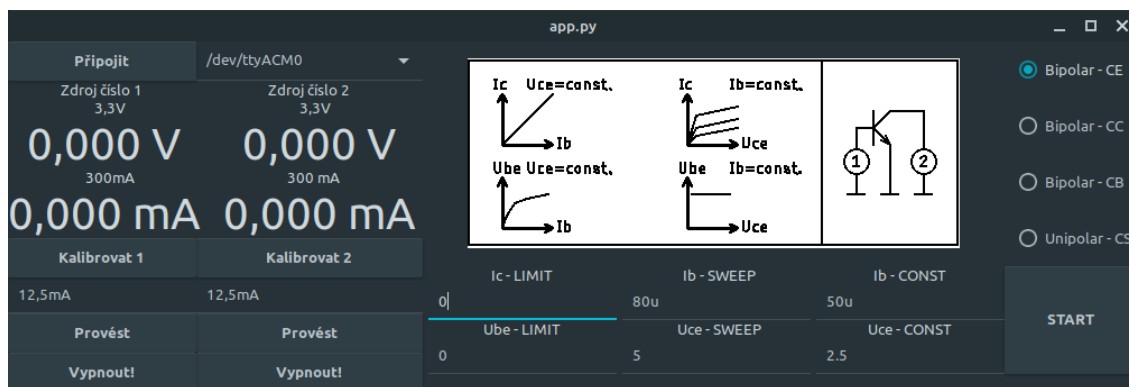


Obr. 4.4: Zapojení v programu P-Spice

Stiskněte tlačítko 'New Simulation Profile', pojmenujte profil 'sweep' a stiskněte OK. Druh analýzy vyberte 'DC Sweep'. Pro odměření výstupní a zpětné charakteristiky zvolte napěťový zdroj 'Uce'. Rozsah rozmítání zvolte na 0 V až 5 V. Stiskněte OK. Tlačítkem RUN spusťte analýzu. Vraťte se zpět do schématu, pomocí sond 'Voltage marker' a 'Current marker' vyberte zkoumaný vývod tranzistoru. Ze získaných charakteristik pomocí kurzorů odečtete diferenční hodnoty podle obr. 4.2. Obdobným způsobem odměřte převodní a vstupní charakteristiku, tentokrát za pomoci rozmítaného proudového zdroje 'Ib'. Rozmítání volte na rozsah 0 μA až 80 μA .

4.3.2 Automatizované měření pomocí analyzátoru

Spusťte program pro automatizované měření. Tlačítkem 'Připojit' navažte s analyzátořem komunikaci. Vyberte druh měření 'Bipolar - CE'. V prostřední části se nacházejí položky pro vyplnění rozsahu rozmítání. Vyplňte je podle následujícího obrázku 4.5.

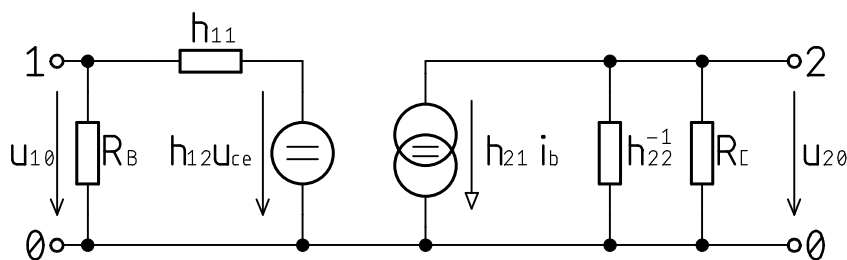


Obr. 4.5: Nastavení rozmítání analyzátoru

Připojte tranzistor k analyzátoru podle zjednodušeného schématu zobrazeného přímo v aplikaci. Výstup měřicího zdroje číslo 1 připojte na bázi tranzistoru. Výstup měřicího zdroje číslo 2 připojte na kolektor tranzistoru. Spojte země obou zdrojů s emitorem tranzistoru. Spusťte automatizované měření tlačítkem 'START'. Na obrazovce se zobrazí okno, ve kterém se začnou vykreslovat charakteristiky. Po dokončení měření získané charakteristiky vytiskněte a zakreslete do nich pracovní bod. Dále pomocí pravítka zjistěte diferenční parametry.

4.3.3 Výpočet parametrů zesilovače

Celkové náhradní schéma linearizovaného modelu zesilovače se nachází na obr. 4.6. Jak je patrné, do linearizovaného modelu přibýly rezistory v bázi a kolektoru.



Obr. 4.6: Náhradní schéma obvodu

Parametr zpětného přenosu bývá zpravidla velmi malý, proto jej lze v tomto případě zanedbat. Vstupní odpor zesilovače je tak roven jako paralelní kombinace hybridního parametru h_{11} a bázevého rezistoru, viz rov. 4.1.

$$Z_{vstup} = \frac{h_{11} \cdot R_B}{h_{11} + R_B} \quad (4.1)$$

Výstupní odpor zesilovače lze vypočítat se zanedbání zpětného přenosu pomocí rovnice 4.2.

$$Z_{vystup} = \frac{1}{h_{22} + \frac{1}{R_C}} \quad (4.2)$$

4.4 Řešení laboratorní úlohy

4.4.1 Měření pomocí simulátoru P-Spice

Výpočet napětí mezi kolektorem a emitorem:

$$U_{CE} = \frac{U_1}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ V}$$

Výpočet bázevého proudu:

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,65}{87000} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Naměřené charakteristiky pomocí simulátoru P-Spice se nacházejí v příloze H. Ukázka výpočtů hybridních parametrů:

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ie} = h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{661,935\text{m} - 666,640\text{m}}{45,946\mu - 53,919\mu} = 657,85 \Omega \quad | U_{CE} = 2,5 \text{ V}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

$$h_{re} = h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} = \frac{664,392\text{m} - 664,431\text{m}}{2,0039 - 2,9997} = 39,16 \cdot 10^{-6} \quad | I_B = 50 \mu$$

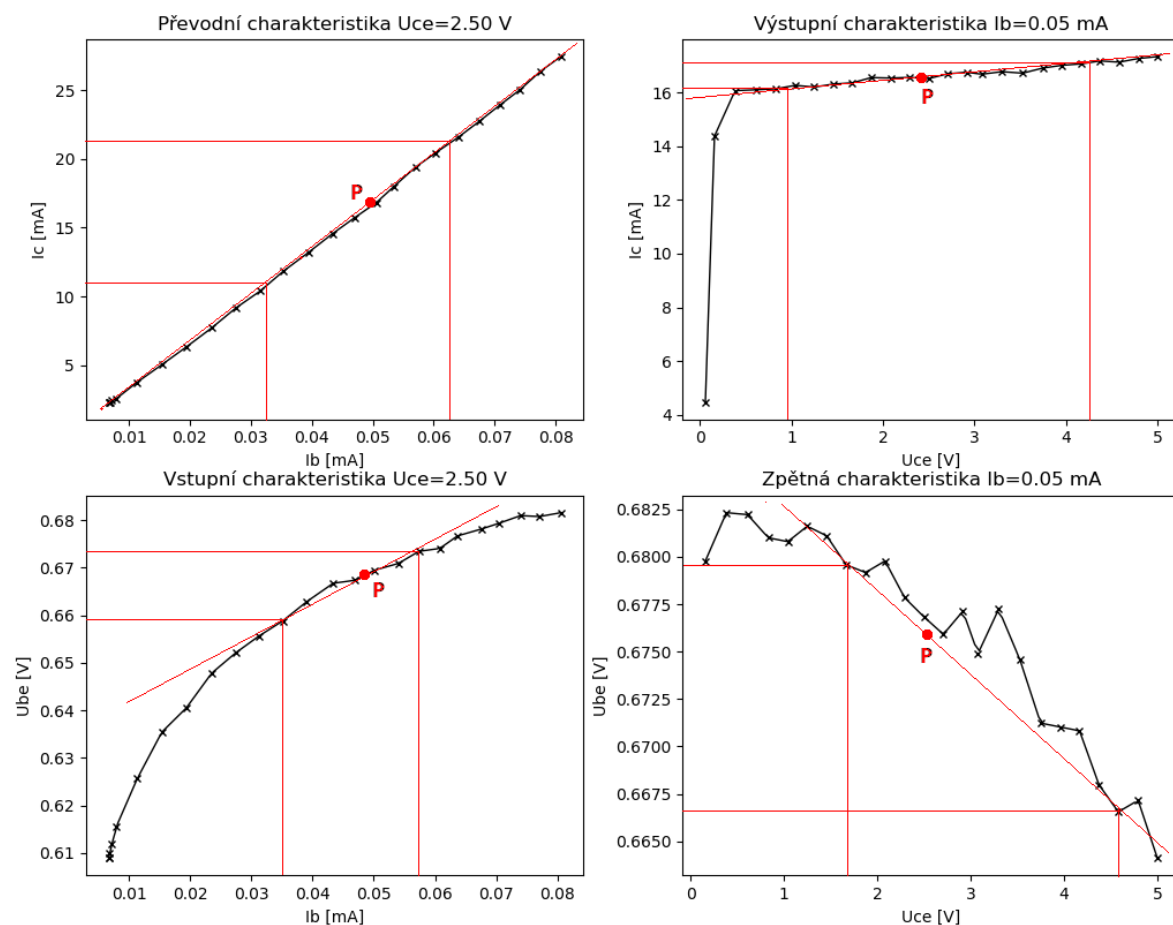
Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fe} = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{19,497\text{m} - 22,766\text{m}}{46,009\mu - 53,946\mu} = 411,86 \quad | U_{CE} = 2,5 \text{ V}$$

Výstupní vodivost naprázdno:

$$h_{oe} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} = \frac{21,030\text{m} - 21,257\text{m}}{2 - 3} = 227 \cdot 10^{-6} \text{ S} \quad | I_B = 50 \mu$$

4.4.2 Automatizované měření pomocí analyzátoru



Obr. 4.7: Získané charakteristiky pomocí počítačem řízeného analyzátoru

Ukázka výpočtů hybridních parametrů:

Vstupní odpor nakrátko:

$$h_{ie} = h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{0,6624 - 0,6735}{39,36\mu - 57,26\mu} = 620,11\ \Omega \quad |U_{CE} = 2,5\text{ V}$$

Zpětný přenos napětí naprázdno:

$$h_{re} = h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} = \frac{0,6803 - 0,666}{0,854 - 4,5766} = -0,00384 \quad |I_B = 50\ \mu$$

Proudové zesílení nakrátko:

$$h_{fe} = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{11,932\text{m} - 20,4897\text{m}}{35,5\mu - 60,3\mu} = 345,07 \quad |U_{CE} = 2,5\text{ V}$$

Výstupní vodivost naprázdno:

$$h_{oe} = h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{U_{CE1} - U_{CE2}} = \frac{16,185\text{m} - 17,259\text{m}}{0,941 - 4,3666} = 313,52 \cdot 10^{-6}\text{ S} \quad |I_B = 50\ \mu$$

4.5 Výpočet parametrů zesilovače

Vstupní odpor zesilovače:

$$Z_{vstup} = \frac{h_{11} \cdot R_B}{h_{11} + R_B} = \frac{620,11 \cdot 87000}{620,11 + 87000} = 615,721 \, \Omega$$

Výstupní odpor zesilovače:

$$Z_{vystup} = \frac{1}{h_{22} + \frac{1}{R_C}} = \frac{1}{313,52 \cdot 10^{-6} + \frac{1}{82000}} = 3070,16 \, \Omega$$

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout přípravek pro automatizované měření charakteristik tranzistorů v jejich třech základních zapojeních. Výsledkem této práce je tak analyzátor, který je schopen měření stejnosměrných charakteristik tranzistorů.

Z dostupné literatury byly zjištěny základní znalosti potřebné pro pochopení funkce tranzistoru, ze kterých vyplývají možnosti, jakým způsobem tranzistor zapojit a jak jej analyzovat. Byly popsány celkem tři možné způsoby jak tranzistor zapojit a nahradit linearizovaným modelem. U každého zapojení byla vytvořena série simulací v programu PSpice, jejichž výsledkem jsou charakteristiky, z nichž byly odečteny hybridní parametry, které jsou nezbytnou součástí linearizovaných modelů.

Za účelem jednoduchého získání skutečných charakteristik a parametrů reálných tranzistorů byl navržen a postaven počítačem řízený analyzátor. V průběhu vývoje bylo vytvořeno nejprve několik pokusných prototypů, na kterých byl ověřen koncept analyzátoru. Tyto prototypy byly velmi poruchové a vykazovaly spoustu nedostatků. Mezi největší problém spadalo zajištění stability použitých operačních zesilovačů. Výstupní operační zesilovač v těchto prototypích byl obohacen o podpůrný obvod z tranzistorů v zapojení push-pull. I přes veškerou snahu se nepodařila zajistit dostatečná stabilita obvodu.

Původně bylo počítáno s použitím laboratorního zdroje jako hlavního zdroje napájení analyzátoru. V době, kdy bylo v plánu analyzátor sestavit, bylo znemožněno na dobu neurčitou pracovat v laboratoři. Vývoj tak pokračoval plně v domácích podmínkách. Většina potřebného vybavení byla k dispozici, chyběl však symetrický napájecí zdroj pro napájení analyzátoru. Byl tak navržen a postaven spínaný napájecí zdroj na jednovrstvém plošném spoji. Výstup byl opatřen filtry a lineárními regulátory.

Poté bylo možné zahájit stavbu finální verze analyzátoru na základě poučení se z chyb vzniklých během prototypování. Důležitou součástí analyzátoru je dvojice počítačem konfigurovatelných zdrojů o nízkém výkonu, která dokáže přesně změřit výstupní napětí a proud. Jelikož se jedná o kombinaci zdroje a způsobu přesného měření, byla tato část analyzátoru nazvána jako "Měřicí zdroj". Vstupní obvod tohoto zdroje z mikrokontroléru v současné podobě je mnohem jednodušší než v případě prototypů. Byl si totiž uvědomen fakt, že napětí z D/A převodníku mikrokontroléru je vždy kladné, odpadá tak v této části obvodu použití nákladnějších analogových spínačů. Jako výstupní operační zesilovač byl zvolen integrovaný obvod LM675, který je rovnou určen pro velké výstupní proudy, a není tak zapotřebí push-pull zapojení jako v případě u jednoho z prototypů.

V této práci byla snaha opodstatnit rovnicemi vybrané hodnoty součástek, které byly získány z dostupné dokumentace a současných znalostí autora. Komplexnost

návazností jednotlivých zapojení byla natolik složitá, že byl vytvořen v tabulkovém procesoru pomocný program na odladění vybraných hodnot rezistorů v obvodech.

Program pro mikrokontrolér, který v analyzátoru plní funkci především jako D/A a A/D převodník, byl napsán v prostředí STM32CubeIDE od firmy ST. Součástí programu tak je zajištění komunikace skrze USB rozhraní s počítačem, převody A/D a D/A. Taktéž i hlídání přetížení měřicího zdroje. Během vývoje programu se ukázalo jako časově náročné implementovat všechny potřebné funkce programu přímo do mikrokontroléru. Byl proto zvolen kompromis, kde mikrokontrolér představuje pouze jenom rozhraní, a zbývající funkce obstará obslužná aplikace pro počítač.

Aplikace pro počítač měla být původně vytvořena v prostředí MATLAB, ale komplexnost programu byla natolik složitá, že aplikace byla vytvořena z časových důvodů v programovacím jazyce Python-3. Prostředí MATLAB totiž neumožňuje efektivně pracovat s objekty a hlavně postrádá možnost předávání referencí na objekty a proměnné. Python-3 je navíc open source řešení, a výsledná aplikace tak může být snadno spuštěna na mnoha operačních systémech.

Aplikace umožňuje manuální ovládání analyzátoru a provádění automatizovaného procesu měření charakteristik tranzistorů. V budoucnu je plánováno aplikaci obohatit o možnost odečtení diferenčních parametrů přímo z grafu. Taktéž je v plánu většinu programu přesunout do mikrokontroléru, a vytvořit tak snadno kamkoliv implementovatelné rozhraní přímo skrze virtuální sériovou linku.

Závěrem této práce bylo vytvoření demonstrační úlohy, která by měla posloužit jako návod studentům. Řešení této demonstrační úlohy tak představuje finální ověření přípravku. Charakteristiky naměřené analyzátozem celkem odpovídají simulacím. Nejvíce se vymyká pouze měření zpětné charakteristiky, které je na hranici rozlišení použitého šestnáctibitového A/D převodníku. Srovnání vypočítaných H-parametrů z charakteristik je na tab. 4.1. Dosud se však nepodařilo odměřit charakteristiky pro jiná zapojení tranzistoru. Měření probíhá v pořádku až do chvíle, kdy se přepálí pojistka z výstupu napájecího zdroje. Na vině je zřejmě neodhalený stav, kdy se výstupní napětí z koncového operační zesilovače rozkmitá. Tento nedostatek je tak předmětem dalšího zkoumání.

Tab. 4.1: Srovnání H-parametrů ze simulace a reálného měření

Název	Simulace	Měření
Vstupní odpor nakrátko h_{11}	657,85 Ω	620,11 Ω
Zpětný přenos napětí naprázdno h_{12}	$39,16 \cdot 10^{-6}$	$3840 \cdot 10^{-6}$
Proudové zesílení nakrátko h_{21}	411,86	345,07
Výstupní vodivost naprázdno h_{22}	$227 \cdot 10^{-6}$ S	$313,52 \cdot 10^{-6}$ S

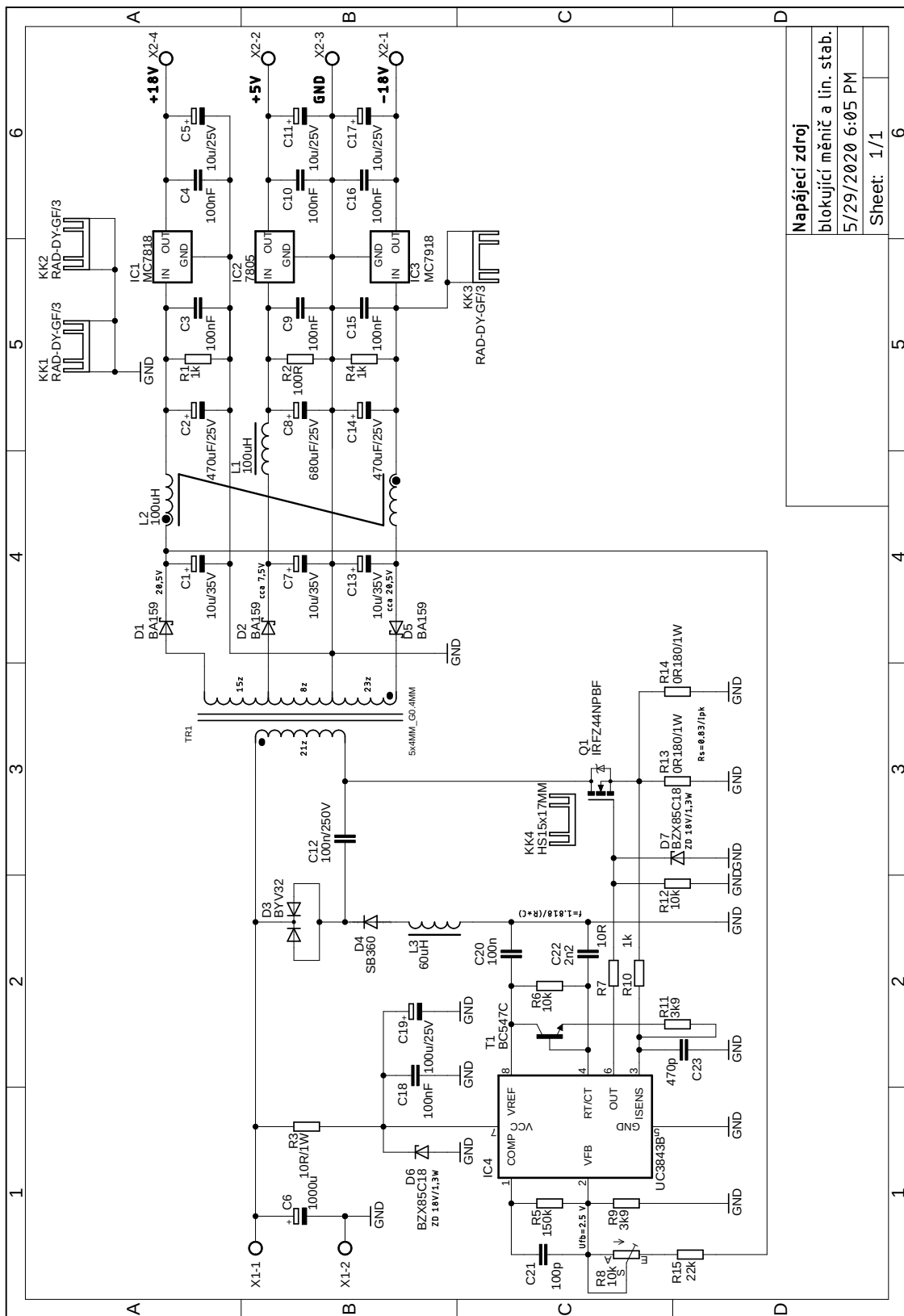
Literatura

- [1] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [2] BELKE, R.E., CLEARY, J.F., ed. *GE Transistor Manual*. 7 ed. Syracuse, N.Y.: Semiconductor Products Dept. General Electric, 1964.
- [3] AMOS, S. W. *Principles of transistor circuits: introduction to the design of amplifiers, receivers and digital circuits*. 7th ed. Boston: Butterworths, 1990. ISBN 978-0-408-04851-4.
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-059-8.
- [5] Datasheet mikrokontroléru STM32F373 - [cit. květen 2020]. Dostupné na: WWW: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f373cc.pdf>
- [6] Datasheet výkonového operačního zesilovače LM675 - [cit. květen 2020]. Dostupné na: WWW: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm675.pdf>
- [7] Datasheet kontroléru UC3843 pro spínané zdroje typu DC/DC - [cit. květen 2020]. Dostupné na: WWW: <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/uc3843-309322.pdf>
- [8] Datasheet tranzistoru BC337 - [cit. prosinec 2019]. Dostupné na: WWW: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC337-D.PDF>
- [9] Informace ke chladiči RAD-DY-GF/3 STONECOLD - [cit. květen 2020]. Dostupné na: WWW: https://www.tme.eu/cz/details/rad-dy-gf_3/chladice/stonecold/
- [10] COUGHLIN, Robert F. a Frederick F. DRISCOLL. *Operational amplifiers and linear integrated circuits*. 6th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2001. ISBN 0-13-014991-8.

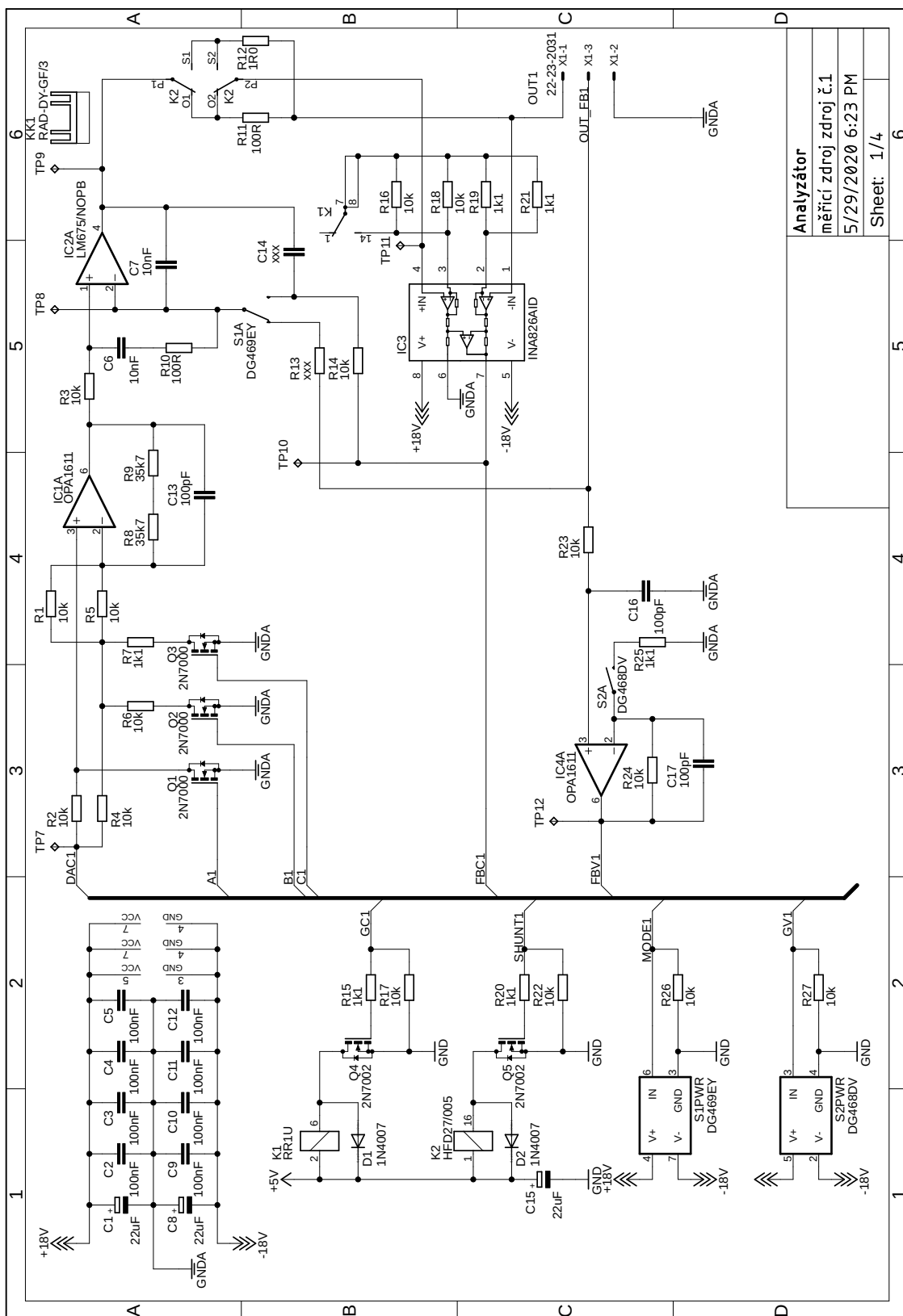
Seznam symbolů, veličin a zkratek

FET	Field Effect Transistor (Tranzistor řízený elektrickým polem)
IGFET	Insulated Gate Field Effect Transistor
JFET	Junction Gate Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OZ	Operational amplifier (Operační zesilovač)
USB	Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)
SRAM	Static random-access memory (Statická paměť)

A Schéma napájecího zdroje

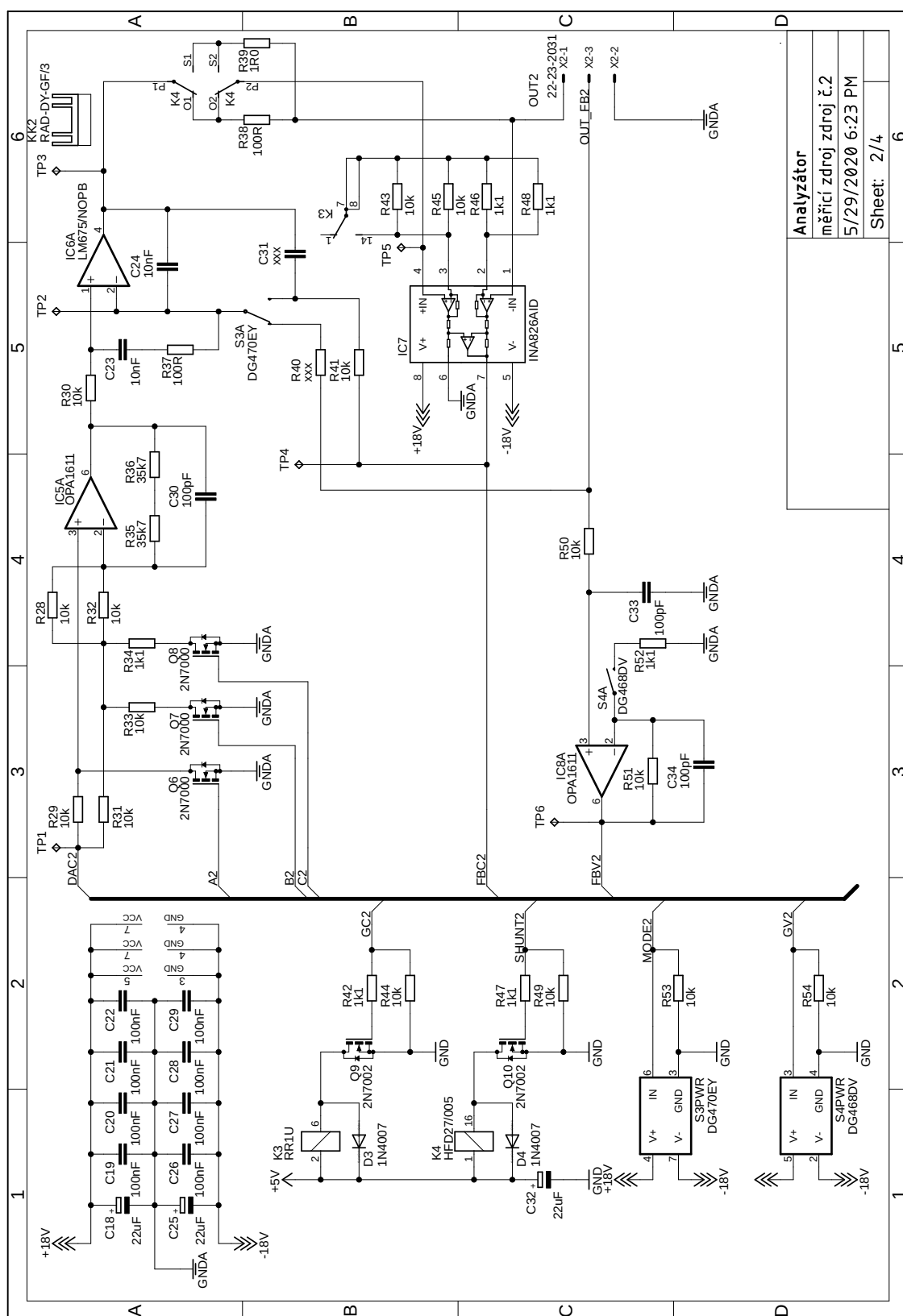


B Analyzátor - schéma měřicího zdroje č.1

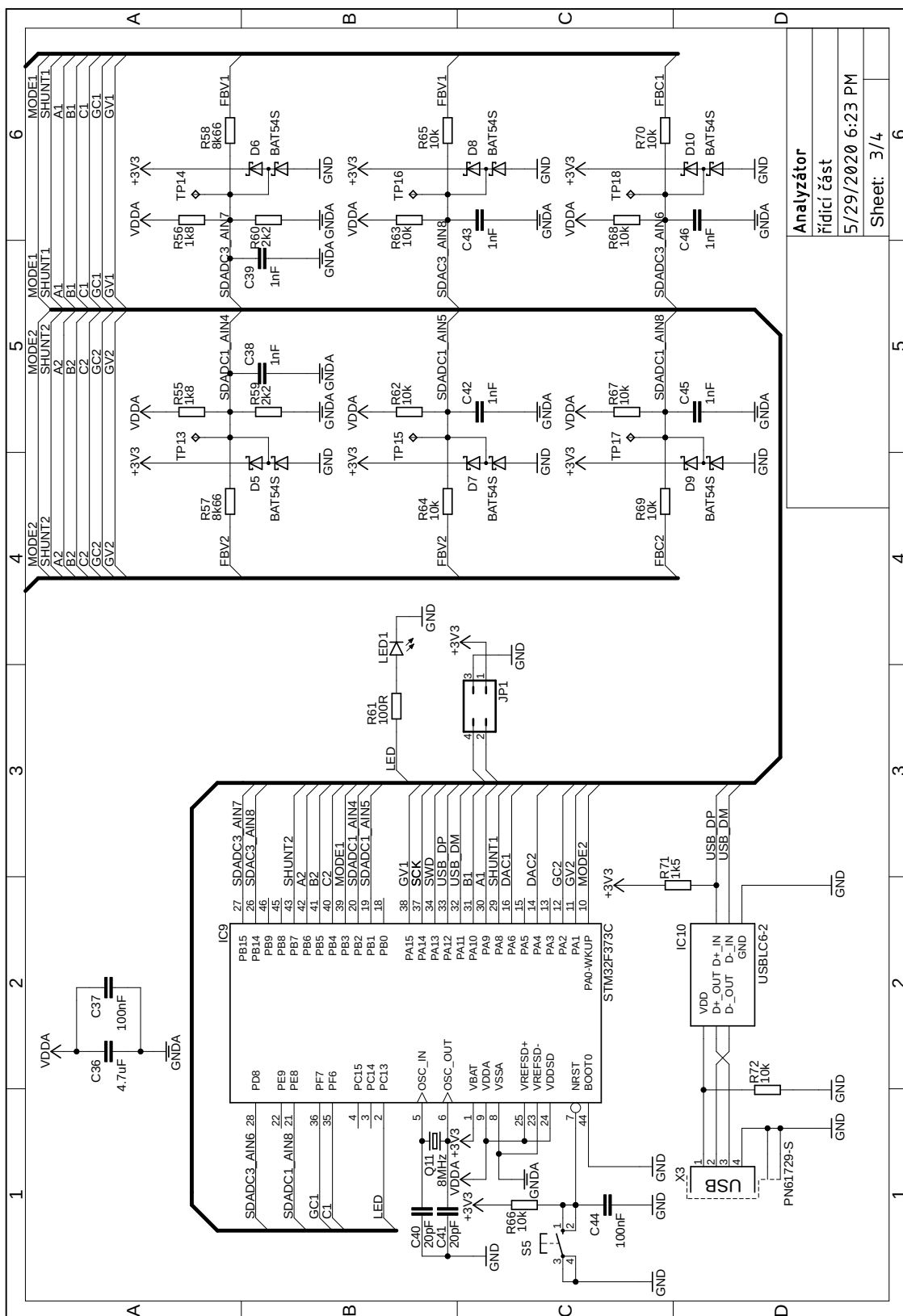


Analyzátor	
měřicí zdroj zdroj č.1	
5/29/2020 6:23 PM	
Sheet: 1/4	

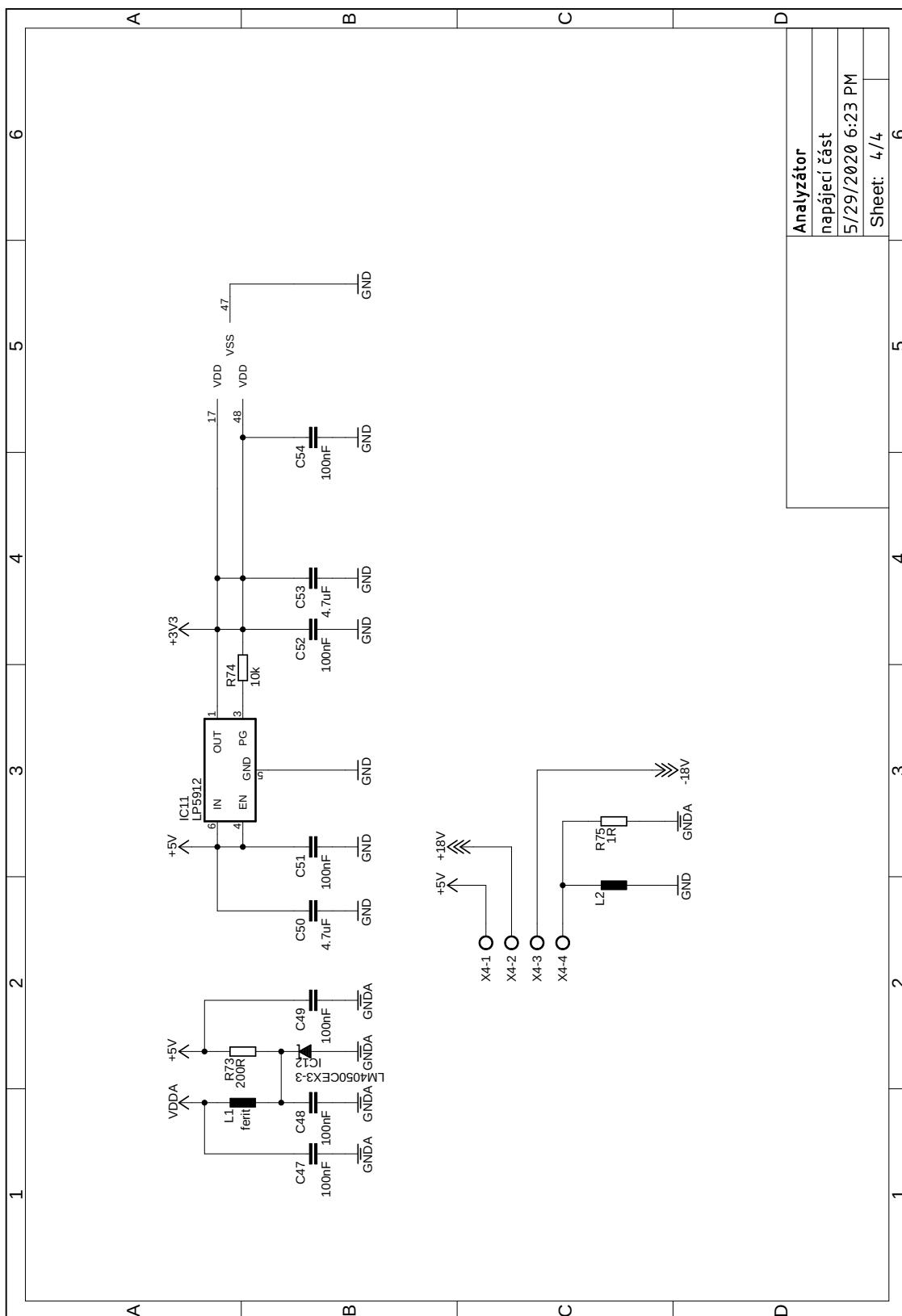
C Analyzátor - schéma měřicího zdroje č.2



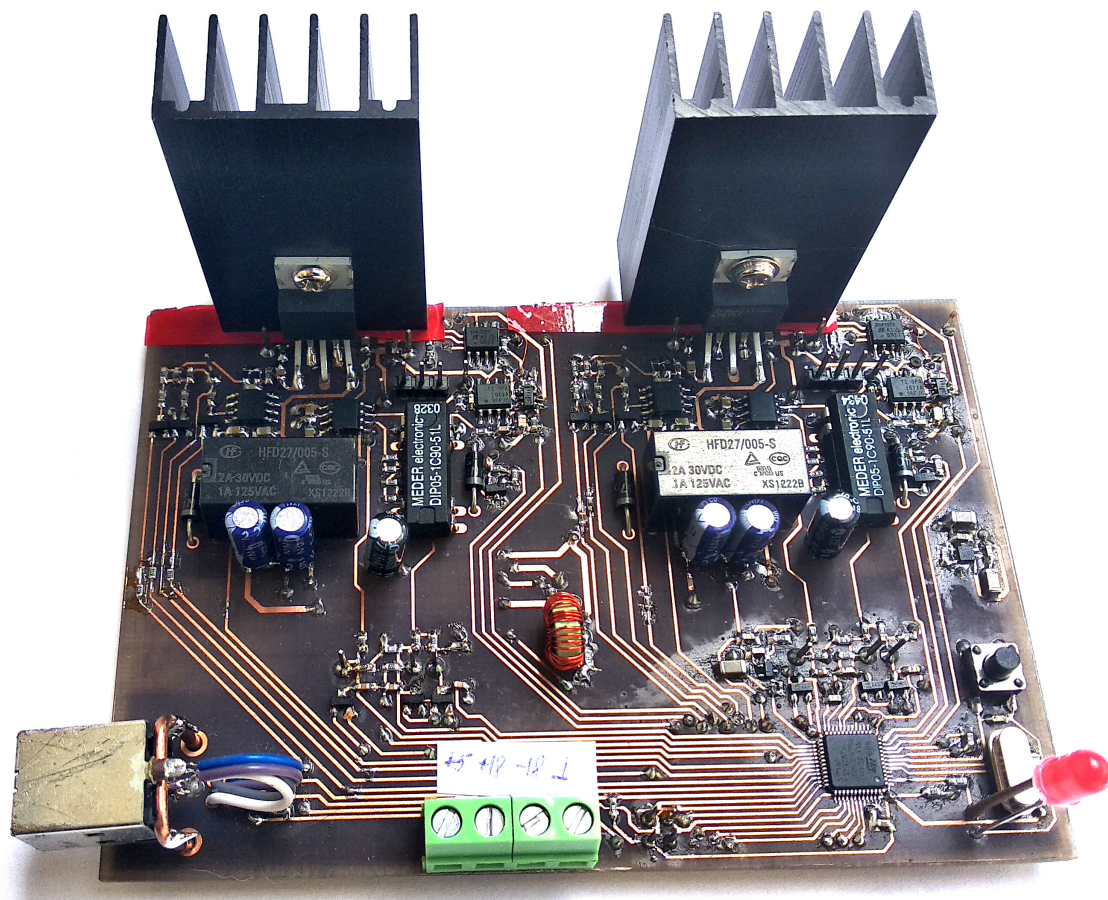
58



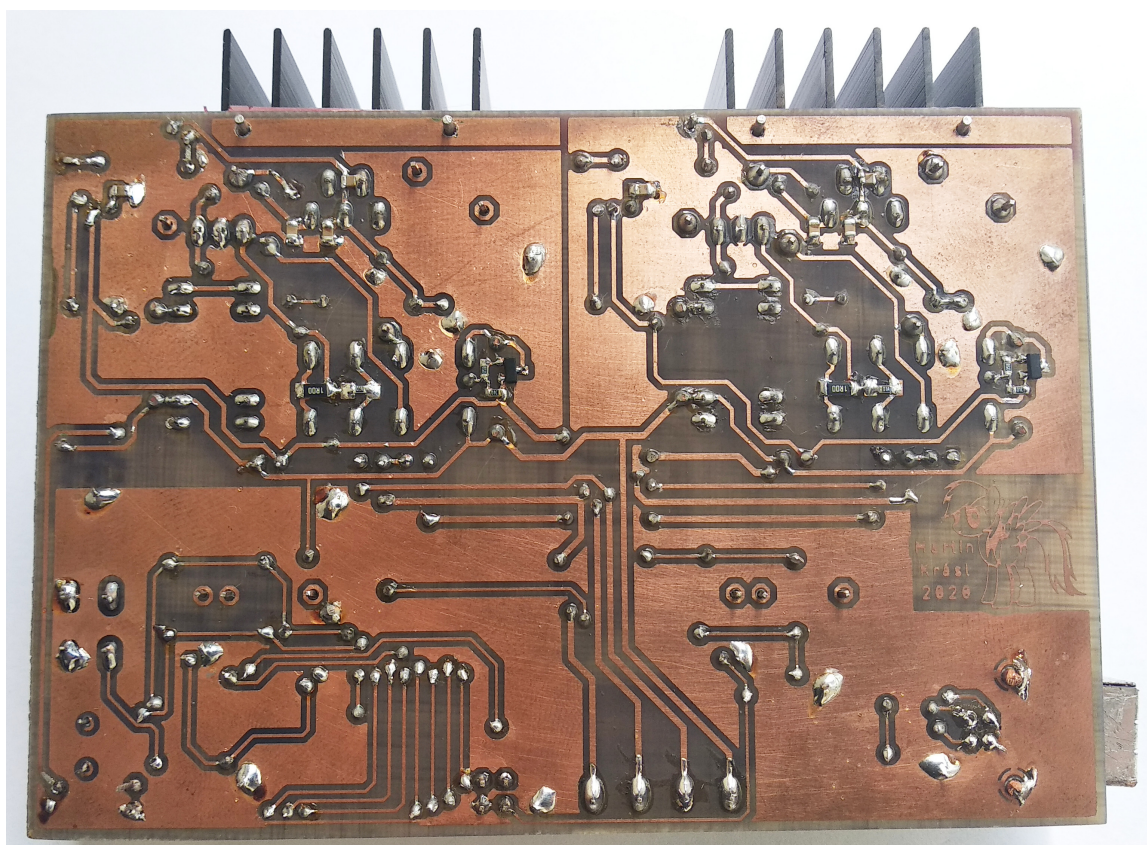
E Analyzátor - napájecí část



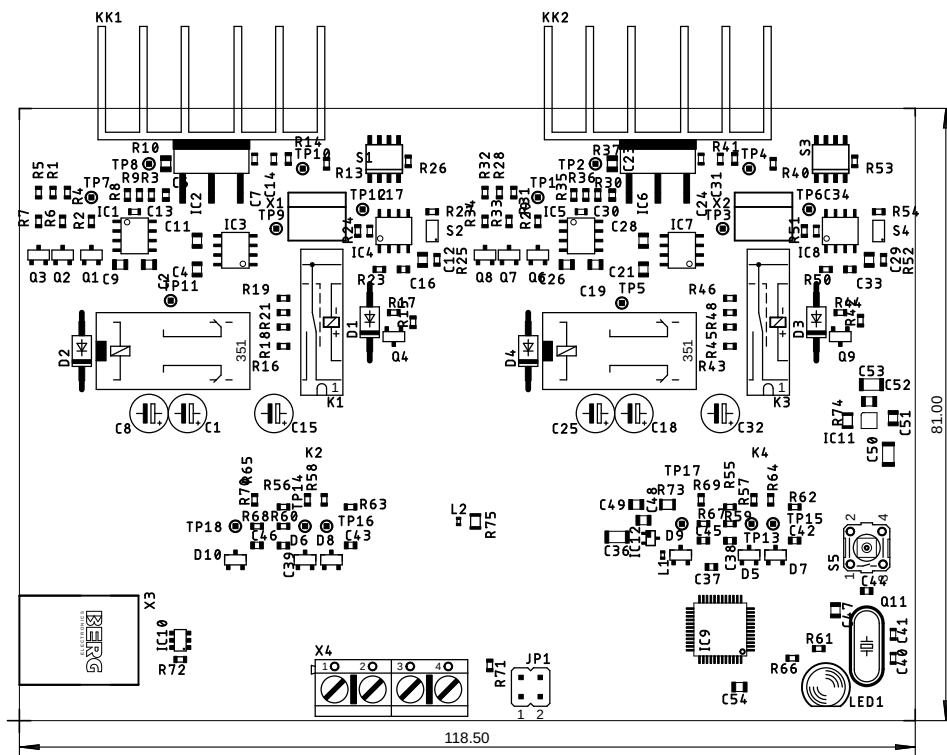
F Analyzátor



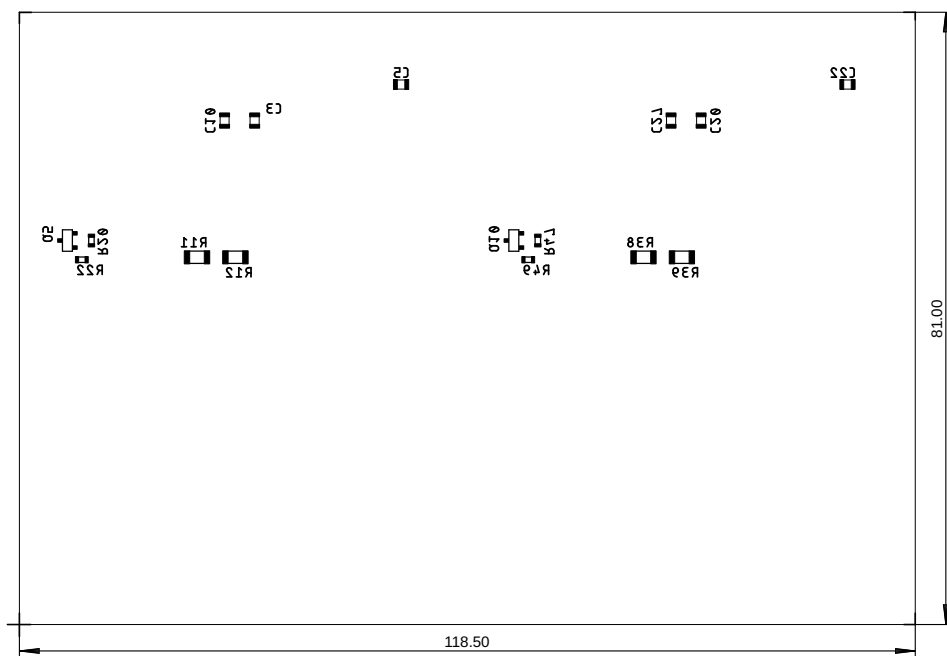
Obr. F.1: Fotografie - Pohled z vrchní strany součástek



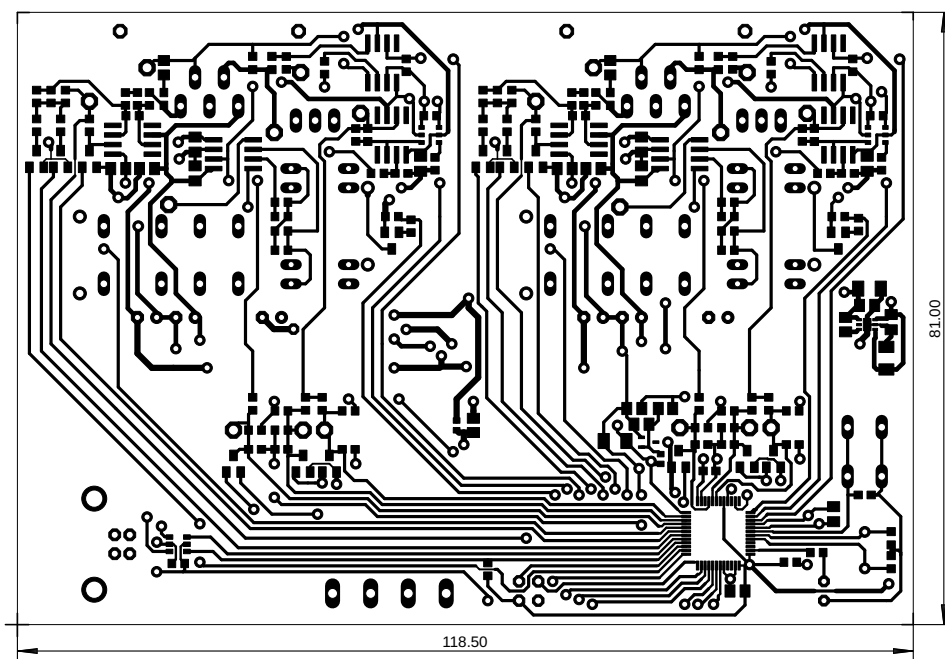
Obr. F.2: Fotografie - Pohled ze spodní strany spojů



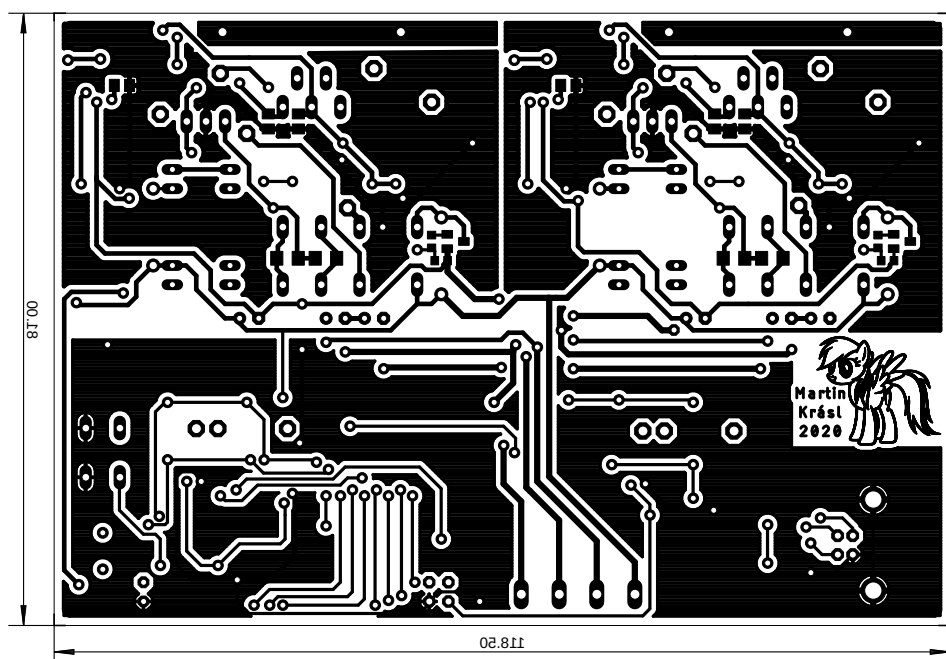
Obr. F.3: Osazovací plán analyzátoru - vrchní strana



Obr. F.4: Osazovací plán analyzátoru - spodní strana

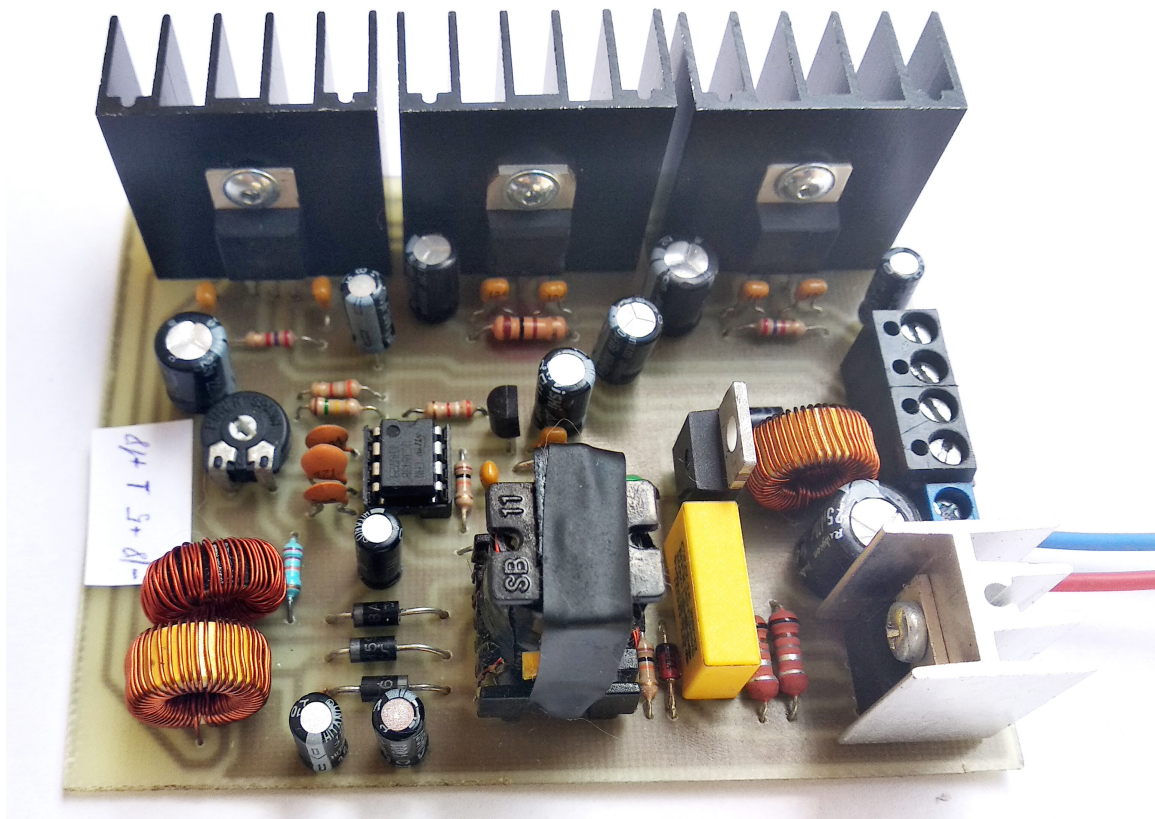


Obr. F.5: Strana spojů analyzátoru - vrchní strana

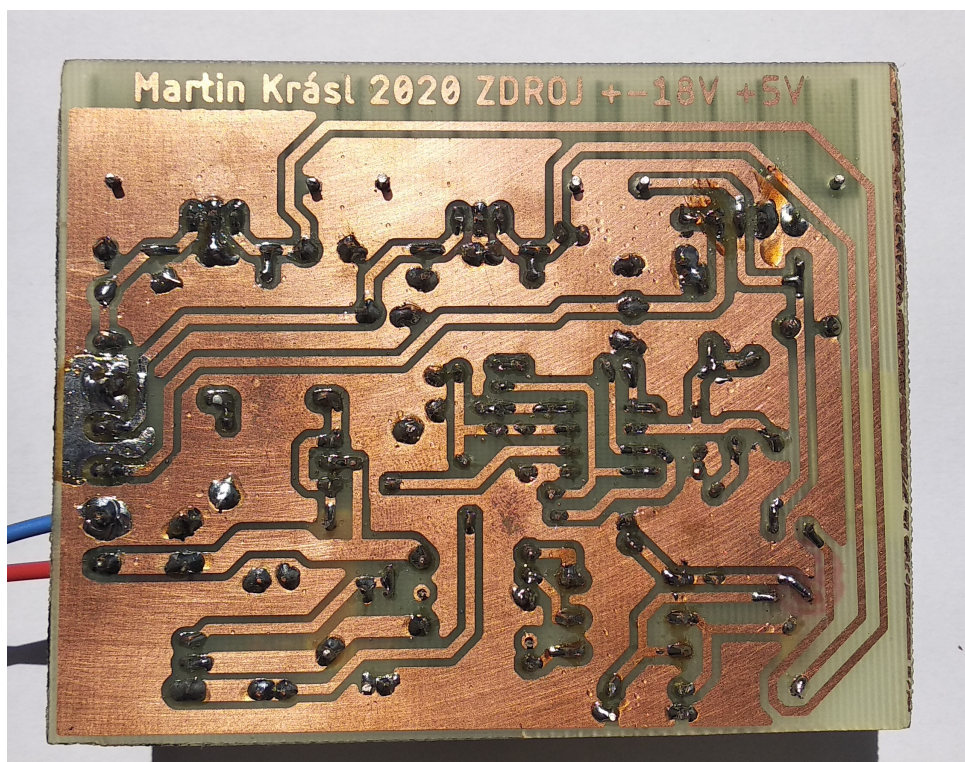


Obr. F.6: Strana spojů analyzátoru - spodní strana

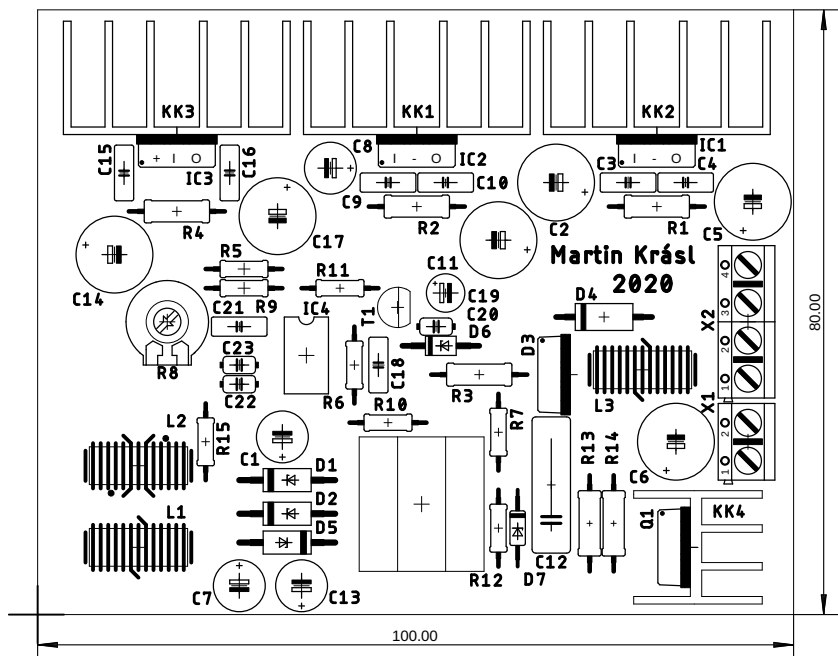
G Napájecí zdroj



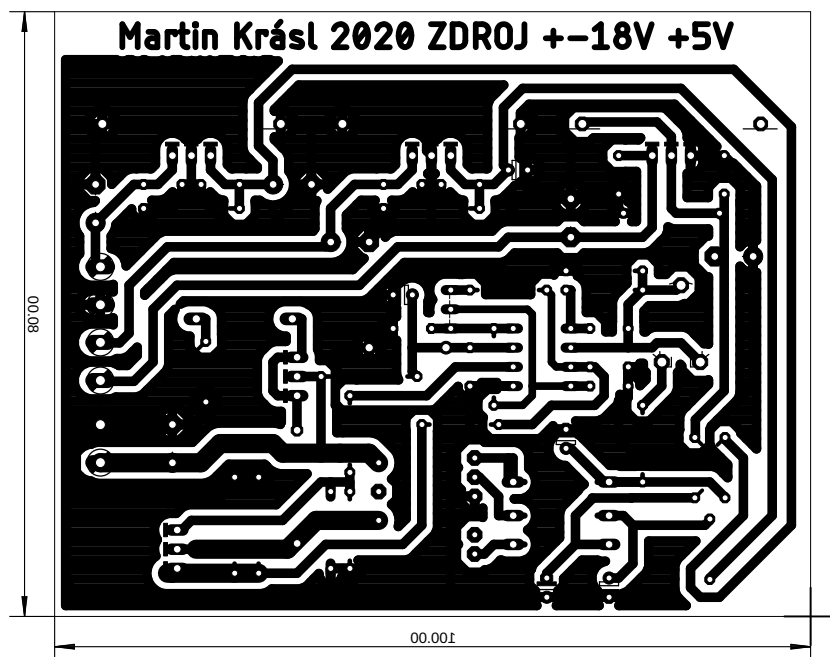
Obr. G.1: Fotografie - Pohled z vrchní strany součástek



Obr. G.2: Fotografie - Pohled ze spodní strany spojů



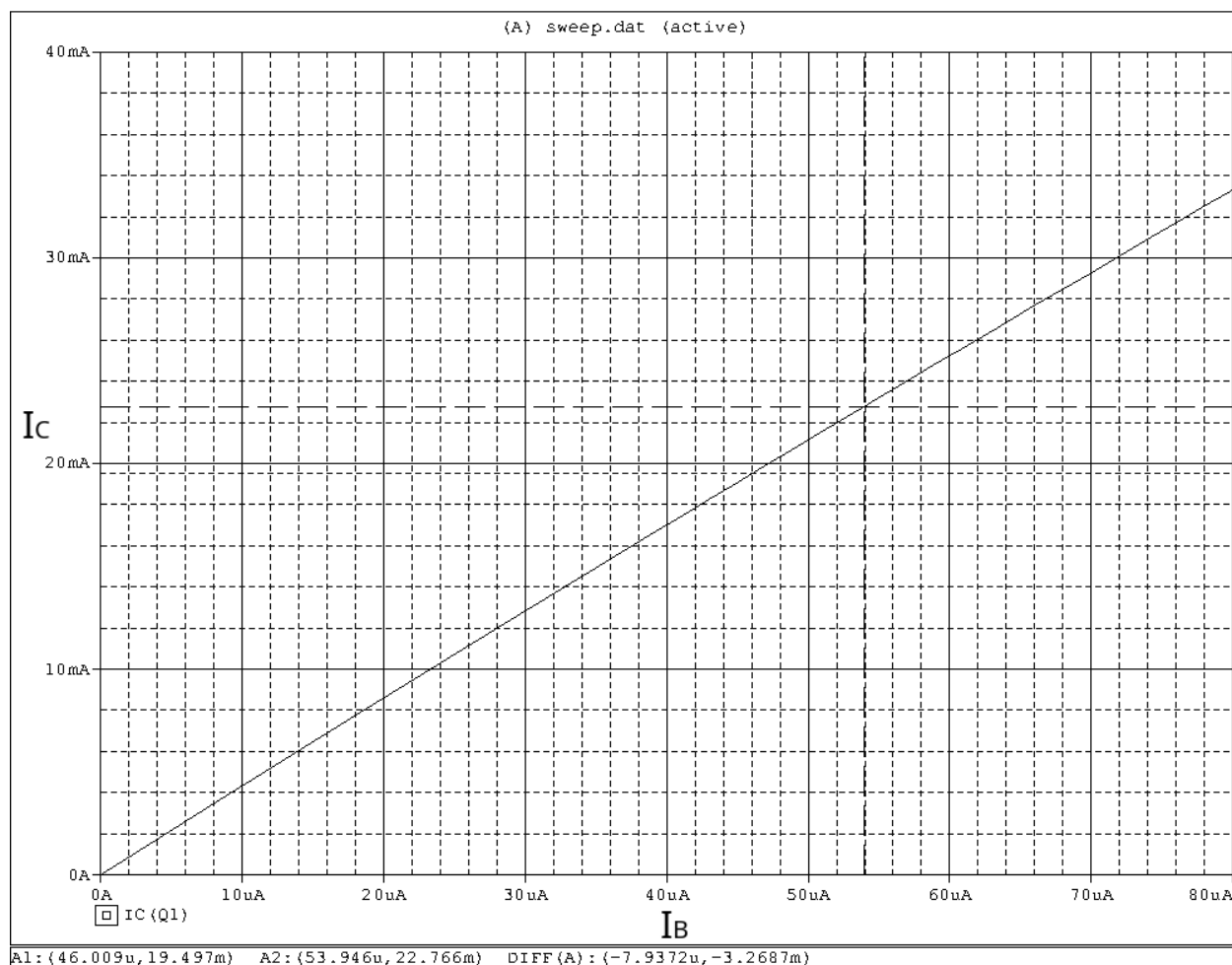
Obr. G.3: Osazovací plán napájecího zdroje - pouze vrchní strana



Obr. G.4: Strana spojů napájecího zdroje - pouze spodní strana

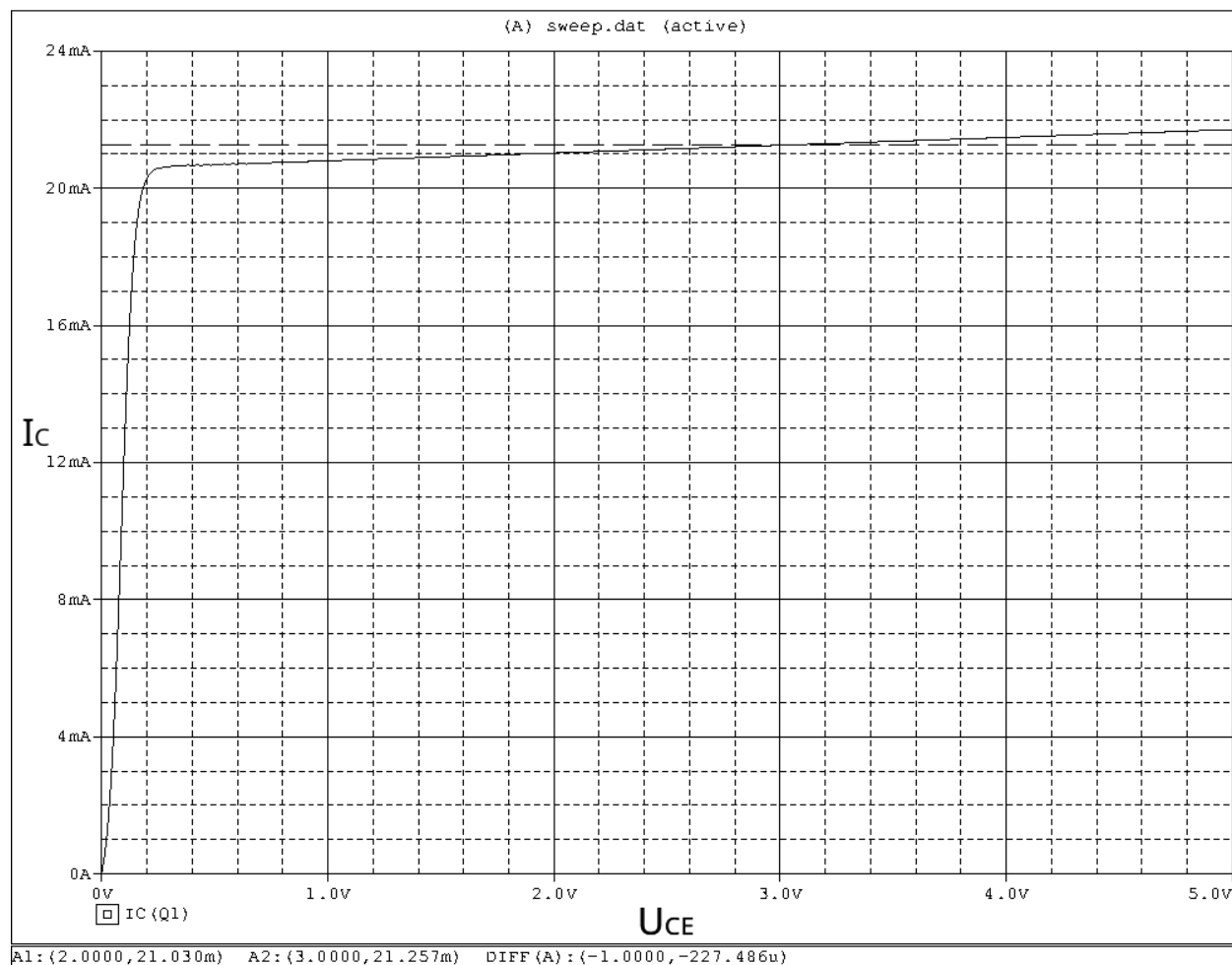
H Demostrační úloha - Charakteristiky z programu P-Spice

H.0.1 Převodní charakteristika



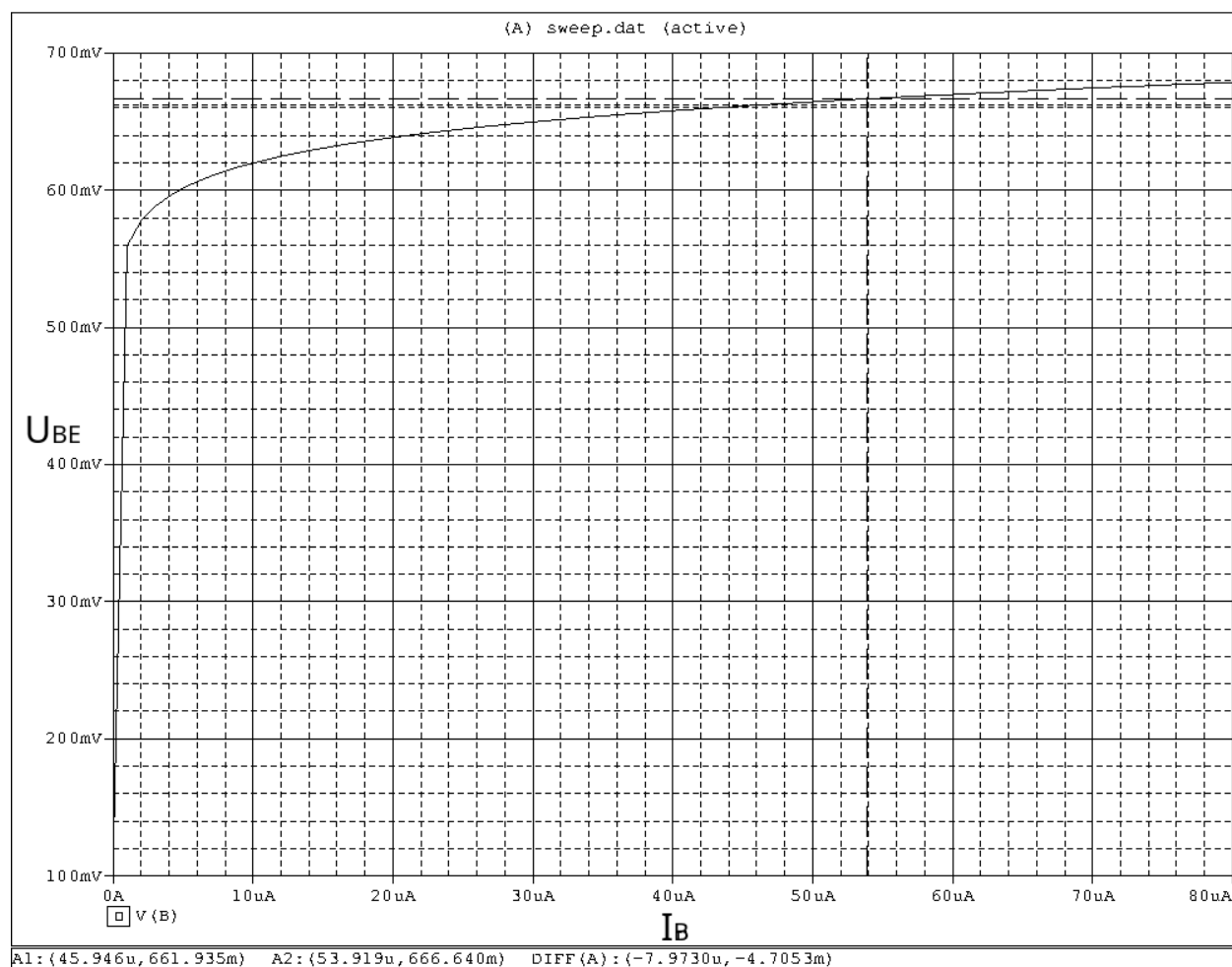
Obr. H.1: Převodní charakteristika

H.0.2 Výstupní charakteristika



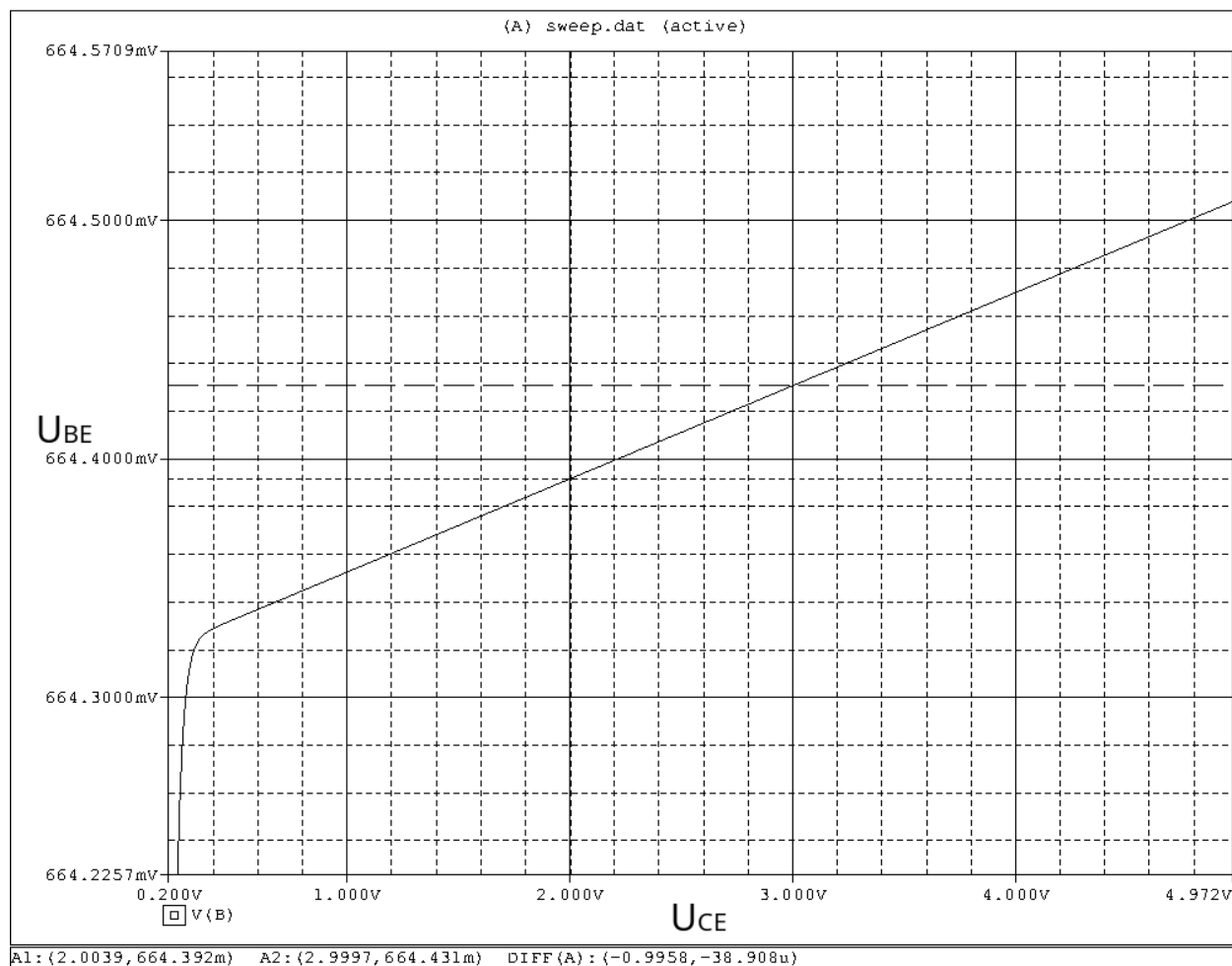
Obr. H.2: Výstupní charakteristika

H.0.3 Vstupní charakteristika



Obr. H.3: Vstupní charakteristika

H.0.4 Zpětná charakteristika



Obr. H.4: Zpětná charakteristika